

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

Ekologie a ochrana prostředí

Ochrana životního prostředí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření rozptylu světla na atmosférickém aerosolu

Aerosol light scattering measurements

Vypracovala: Nikola Novotná

Vedoucí: RNDr. Naděžda Slezáčková Zíková, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila pouze uvedené prameny a literaturu.

V Praze, 20. 5. 2015

Nikola Novotná

Poděkování

Ráda bych vyjádřila poděkování vedoucí této bakalářské práce RNDr. Naděždě Slezáčkové Zíkové, Ph.D. za její cenné rady, trpělivost a ochotu pomoci při vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych ráda poděkovala CzechGlobe a Ústavu chemických procesů AV ČR za poskytnutí dat. V neposlední řadě touto cestou děkuji mé rodině za neutuchající podporu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá základním zpracováním dat rozptylu světla, který byl měřen na třech vlnových délkách pomocí Integračního Nephelometru. Měření probíhalo v observatoři v Košeticích, kde je nephelometer od poloviny roku 2012 umístěn. Sběr dat probíhal ve dvou kalendářních letech (2013 a 2014) a měření v současné době dál probíhá. Data jsou zpracována tak, aby byla vhodným podkladem pro další výzkumy v oblasti meteorologie a klimatologie. Jsou vypočítány základní parametry, jako je Angstroemův exponent, průměrná hodnota, medián a roční a denní chod. Veškeré závislosti a chody jsou graficky znázorněny a okomentovány. Mimo jiné bylo během zpracování dat zjištěno například, že průměrný koeficient rozptylu byl v obou letech velmi podobný nebo že koeficient rozptylu je vyšší v zimních měsících. Práce také diskutuje další možná měření.

Klíčová slova: atmosférický aerosol, rozptyl světla, nephelometer, Angstroemův exponent

Abstract

This thesis' objective is basic data processing of light scattering, which was measured using three-wavelength Integrating Nephelometer. Measurements were carried out at observatory in Košetice, where the nephelometer has been placed since mid-2012. The data collection was carried out during two calendar years (2013 and 2014) and the measurement still continues there. Data is processed in a manner to be suitable for using in future research in the field of meteorology and climatology. Basic parameters such as Angstroem exponent, average value, median and annual and daily cycles are calculated. All dependencies and cycles are graphically represented and commented. Besides other things, it was found out during the data processing that e.g. average coefficient of light scattering was very similar in both years or that the scattering coefficient was higher in winter months. In addition, the thesis discusses another options for future measurements.

Key words: atmospheric aerosol, light scattering, nephelometer, Angstroem exponent

Obsah

1. Úvod	6
2. Atmosférický aerosol	8
2.1. Charakteristika a vlastnosti	8
2.2. Optické vlastnosti	10
2.2.1. Vlnová délka	10
2.2.2. Rozptyl světla	11
2.2.2.1. Rayleighův rozptyl	12
2.2.2.2. Mieův rozptyl	12
2.2.3. Extinkce	13
2.2.4. Vidity	13
3. Metodika měření rozptylu světla na atmosférickém aerosolu	14
3.1. Nephelometer	14
3.1.1. Seznámení, historie	14
3.1.2. Konstrukce a mechanismus	15
3.1.3. Kalibrace	16
3.1.4. Teorie integrace rozptylu	17
3.2. Zpracování dat	18
3.2.1. Popis lokality, sběr dat	18
3.2.2. Použité vzorce a veličiny	19
3.2.3. Metodika zpracování dat	20
3.2.3.1. Korekce	20
3.2.4. Statistické zpracování dat	22
4. Výsledky a diskuze	24
4.1. Průměrné hodnoty	24
4.2. Průběh v čase	24
4.3. Roční chod	28
4.4. Denní chod	29
5. Závěr	31
6. Literatura	32
7. Přílohy	34

Úvod

Vývoj teorií o rozptylu světla sahá až do 10. století. První, kdo se zabýval teorií světla, byl Abu Ali al-Hasan ibn al-Haytham, arabský matematik a astronom, který popsal vnímání okolního světa jako odraz světla od předmětů a dopad odražených paprsků na oko pozorovatele (O'Connor & Robertson, 1999). V té době byla také velká snaha zjistit, proč je vlastně obloha modrá. První teorie byly založené na barvách molekul, tedy, že modrá převažuje. Toto tvrzení vyvrátil anglický fyzik, matematik a astronom Isaac Newton (1643-1722). Pokrok se dostavil téměř po 200 letech, s výzkumy J. Tyndalla a Lorda Rayleighe. Na jejich výzkumy navázali další vědci, jako byl například Anders Ångström, který se zabýval korelací mezi velikostí částice a její schopností rozptylovat světlo o určité vlnové délce. Od 50. a zejména 60. let probíhá měření rozptylu světla na atmosférickém aerosolu po celém světě a ročně vyjde na toto téma řada vědeckých prací.

Od roku 2012 je v České republice v kraji Vysočina umístěn nejmodernější TSI nephelometer pro měření rozptylu světla na atmosférickém aerosolu na třech vlnových délkách. Jedná se na našem území o zatím unikátní měření a naměřená data jsou u nás první svého druhu.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. Nejprve je část rešeršní, kde je popsán samotný aerosol a následně jeho optické vlastnosti se zaměřením zejména na rozptyl světla. Seznámíme se také detailněji se samotným TSI nephelometrem, jeho historickým vývojem a podrobným popisem jeho částí a funkcí. V další části je bakalářská práce věnována samotnému zpracování prvních naměřených dat, a to za dva kalendářní roky (2013 a 2014). Zpracování se týkalo úpravy dat pro jejich další využití, následných korekcí a statistického zpracování, které bylo graficky znázorněno a okomentováno. Z výsledků dat byly vyvozeny základní charakteristické znaky, jako například odhad velikosti aerosolových částic, na kterých měření rozptylu světla probíhalo.

K rešeršní i praktické části byly využívány zejména zahraniční zdroje zabývajícími se prvními měřeními a korekcemi TSI nephelometeru ve světě. Stěžejní prací byl výzkum *T. L. Andersona*, a to především jeho práce *Performance Characteristic of a High-Sensitivity, Three-Wavelength, Total-scatter / Backscatter Nephelometer* (1996) a *Determining Aerosol Radiative Properties Using the TSI 3563 Integrating Nephelometer* (1998). Dále byly využity novější výzkumy týkající se

kompletních korekcí a možností využití nephelometeru. Samozřejmostí byly i původní práce, ze kterých teorie rozptylu světla vychází.

1. Atmosférický aerosol

1.1. Charakteristika a vlastnosti

Definice:

Atmosférický aerosol jsou částice aerosolů, které se vyskytují v atmosféře. Je to složitá směs pevných a kapalných částic jak z přírodních, tak z antropogenních zdrojů (Hinds, 1999).

Charakteristika

Částice se v atmosféře vyskytují v mnoha různých formách, jako je například prach, kouř, mlha a podobně. Tyto částice ovlivňují jak viditelnost, tak klimatické podmínky, a v neposlední řadě mají také vliv na zdraví organismů, včetně člověka (Hinds, 1999).

Zhruba 70% veškerého aerosolu v atmosféře pochází z přírodních zdrojů, a to zejména mořské soli, prach a přírodní sulfáty. Nicméně toto procento se mění v závislosti na regionu a ročním období. Novější výzkumy ukazují, že stále více aerosolu v atmosféře pochází z antropogenních činností. Někdy je ale obtížné jednoznačně říci, který typ aerosolu pochází z antropogenního, či z přírodního zdroje (Satheesh & Krishnamoorthy, 2005). Existují například situace, kdy je antropogenní činností způsoben lesní požár, který je však přírodě blízký – bez dalších zásahů a příměsí, které se spalují.

Aerosoly mají v neposlední řadě významný vliv na klimatický systém Země. Zejména díky přímé schopnosti absorbovat a rozptylovat sluneční záření, a nepřímo také kvůli vzniku oblaků kondenzací na částicích (Gopal et al., 2014). Aerosol se skládá z nejrůznějších typů látek, a téměř každý typ ovlivňuje klimatický systém naší planety jinak. Například minerální prachové částice jsou transportovány přes oceány i pevninu, a díky kombinaci rozptylu a absorpce světla mají vůči povrchu spíše ochlazující efekt. Dalším příkladem mohou být částice solí uvolňovaných z oceánů, které se díky silným povětrnostním jevům mohou stát kondenzačními jádry, tím zvýšit množství kapek, které se shlukují do oblaků, a tím dojde ke zvýšení albeda Země (Satheesh & Krishnamoorthy, 2005). Tyto mechanismy můžeme nazvat jako tzv. „whitehouse“ efekt (je analogický, ale opačný k tzv. skleníkovému efektu). Výzkum

Schwartz (1996) prokázal, že „whitehouse“ efekt může mít ochlazující funkci vůči skleníkovému efektu o 20 – 100 % (Hinds, 1999; Schwartz, 1996).

Velikost aerosolů

Velikost aerosolů je jedním z nejzákladnějších parametrů pro predikci jejich vlastností a chování. Velikost se nejčastěji popisuje v mikrometrech (μm), kdy se 1 mikrometr rovná 10^{-6} metru nebo též 10 000 Å (Angstroem) (Vallero, 2008). Velikostní škála aerosolů je velmi velká, setkáváme se s aerosoly o velikosti od 0,001 μm až po 1000 μm . Největší hmota aerosolů se pohybuje kolem velikosti 1 - 10 μm a patří sem například prach, pylová zrna atd. Menší než 1 μm (tzv. sub mikronové částice) jsou například částice kouře, nebo produkty kondenzace či nukleace. Tyto částice mají také za následek ohrožení zdravotního stavu člověka (dostanou se velmi hluboko do respiračního systému člověka) (Vallero, 2008). Částice menší než 50 nm jsou nazývané nano částice. S částicemi většími než 10 μm se v atmosféře setkáváme minimálně (Hinds, 1999). Velmi malé částice zůstávají v atmosféře rozptýlené poměrně dlouhou dobu, a mohou být velmi snadno transportovány do jiných oblastí.

Při charakterizaci aerosolů se využívá dělení na tři frakce – PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_1 . Hrubé částice, neboli PM_{10} , jsou částice o aerodynamickém průměru menším než 10 μm . Pod označení $\text{PM}_{2,5}$ spadají částice menší než 2,5 μm a jako jemný mód (PM_1) jsou označovány částice o aerodynamickém průměru menším než 1 μm . V ojedinělých případech se pozoruje i frakce $\text{PM}_{0,1}$, kam spadají částice menší než 100 nm (Hinds, 1999; Jacobson, 2002).

Podle velikosti můžeme aerosolové částice zařadit do tzv. módů. Nejmenší částice (do 0,1 μm), vzniklé kondenzací atmosférických plynů nebo emisí ze spalovacích procesů spadají do nukleačního módu. Následuje mód akumulární, kam spadají částice ve velikostním rozmezí 0,1 – 2 μm , které vznikají koagulací částic z nukleačního módu. Největší částice spadají do módu hrubých částic. Tyto částice vznikají hlavně mechanickou činností (Dohányosová, Kubincová, Smolík, Schwartz, & Ždímal, 2007; Jacobson, 2002).

Vlastnosti

Abychom dokázali porozumět vlivu aerosolu na veškeré živé i neživé systémy, je nutné zároveň pochopit chemické i fyzikální vlastnosti aerosolu. Je samozřejmé, že se mění i v závislosti s nadmořskou výškou.

U aerosolů můžeme pozorovat několik typů vlastností, jako je například stabilita, koagulace, elektrické vlastnosti a optické vlastnosti, které jsou v této práci podrobněji popsány v další kapitole.

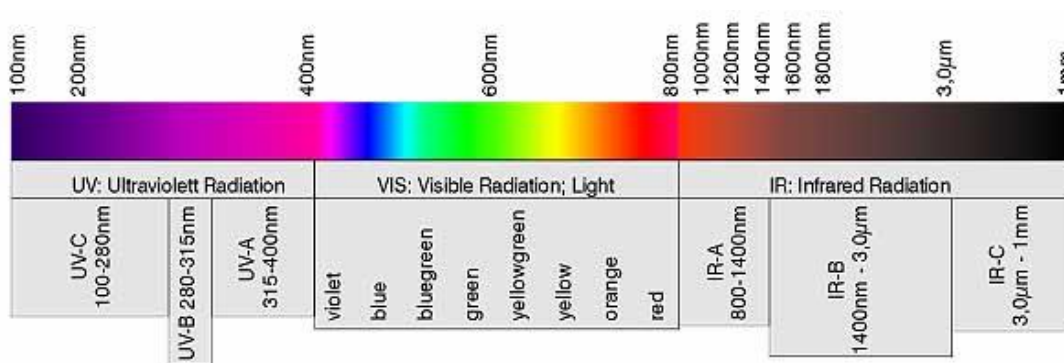
1.2. Optické vlastnosti

Optické vlastnosti atmosférického aerosolu patří mezi jedny z nejdůležitějších vlastností, v nepolední řadě také díky jejich vlivu na klimatický systém Země, který je schopností aerosolů absorbovat a rozptylovat světlo značně ovlivňován. Výhodou měření optických vlastností je, že používané metody jsou velmi citlivé a téměř okamžité.

1.2.1. Vlnová délka

Lidské oko je schopné zaznamenávat pouze určitou část spektra, a to od přibližně 400 nm do 800 nm. Přitom nejvíce je citlivé na střední část, tedy zelenou a žlutou (cca 600 nm). Naše oko se vyvíjelo několik milionů let, aby bylo schopné vnímat alespoň tuto část.

Nejdelší vlnovou délku z viditelné části spektra má červené světlo – kolem 780 nm. Žlutá až zelená má přibližně 550 nm a fialová, nejkratší, 380 nm. „Nad“ červenou, tj. v oblasti delších vlnových délek, ještě rozlišujeme infračervené záření, mikrovlny a radiové vlny. V oblasti kratších vlnových délek je ve spektru ultrafialové záření, rentgenové záření a gama záření. Čím delší vlnová délka elektromagnetického záření je, tím menší je jeho frekvence a naopak. Podle kvantové teorie vyprodukují vysokofrekvenční vlny více energie než nízkofrekvenční. Z toho vyplývá, že ultrafialové světlo vyprodukuje více energie na jednotku fotonu než radiové vlny (Robinson, 2007).



Obrázek 1. Škála vlnových délek. Převzato z (“Gigahertz-Optik,” 2015)

1.2.2. Rozptyl světla

Rozptyl světla lze definovat jako odchylku šíření světla od původního směru, vyvolanou interakcí s molekulami plynných složek vzduchu a nejrůznějšími aerosolovými částicemi. Je-li vlnová délka rozptýleného světla stejná jako u světla dopadajícího, jedná se o pružný rozptyl (Bergmann, Niedrig, & Schaefer, 1999). Velikost rozptylu, jeho množství a směr, závisí na velikosti vlnové délky, velikosti částice, hustotě prostředí, tvaru částice, refrakčním indexu, a na úhlu mezi směrem záření a směru odrazu. Rozlišují se tři typy rozptylu světla. První je Rayleighův rozptyl, tzv. molekulární, který probíhá na molekulách vzduchu. Druhý typ je Mieův rozptyl, ne-molekulární, kdy dochází k rozptylu světla na pevných a kapalných částicích. Třetím typem je tzv. neselektivní rozptyl, který nezávisí na vlnové délce – dochází k němu na částicích, jejichž průměr je desetkrát větší než vlnová délka a můžeme se s ním setkat zejména v troposféře, kde dochází k rozptylu světla na oblačnosti (Bergmann et al., 1999).

Rozptyl světla se velmi liší s velikostí částic. Rozptyl na malých částicích (menší než 0,05 μm) dobře popisuje Rayleighova teorie. Na částice větší než 10 μm je třeba využít geometrickou optiku – rozptyl, odraz a lom světla. Jsou-li velikosti částic mezi 0,05 a 10 μm, je zapotřebí využít mnohem komplikovanější Mieovy teorie. Rozptyl na těchto částicích je komplikovanější z toho důvodu, že velikost částic a vlnová délka světla mají stejnou řádovou hodnotu (Hinds, 1999; Manual, 2005).

Rozptyl světla můžeme vypočítat podle vztahu:

$$\sigma_{sp} = \sum_{i=1}^{N_B} n_i \pi r_i^2 Q_{si}, \quad (1)$$

kde N_B je suma velikostí částic, n_i je koncentrace částic (počet částic na centimetr čtvereční vzduchu), r_i je poloměr částice (v cm), πr_i^2 je skutečný průřez částice za předpokladu, že se jedná o kulovou částici a Q_{si} je absorpční a rozptylový koeficient jedné částice (Jacobson, 2002).

Vedle klasického rozptylu se měří ještě tzv. zpětný rozptyl. Zpětný rozptyl je velmi užitečný parametr pro popisování ochlazujícího účinku aerosolu na klima, v podstatě se jedná o frakci rozptýleného záření, která se vrací zpět do kosmu. Je díky němu možno zjistit i dopředný rozptyl světla, a získat tak odhad rozptýleného světla dopadajícího na zemský povrch. Koeficient zpětného rozptylu je vyšší pro jemné prachové částice a pro částice vznikající například požáry lesů. Velikost rozptylu je závislá na množství přítomného aerosolu v atmosféře a pomáhá charakterizaci jeho vlastností (Gopal et al., 2014).

1.2.2.1. Rayleighův rozptyl

Lord Rayleigh (vlastním jménem John William Streett, 1842 - 1919) se zabýval především teorií vln a kmitů, akustiky a optiky.

Zatímco Tyndall se zabýval zejména rozptylem světla v zakaleném prostředí, Rayleigh se zajímal o rozptyl přímo na čistém vzduchu. Z jeho experimentů vyplývá, že intenzita rozptýleného světla je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky dopadajícího světla, což dává za vznik například modré obloze, nejlépe je tedy rozptylováno světlo s nejkratší vlnovou délkou (modré). Práce pod názvem „O záři oblohy, její polarizaci a barvě“ publikoval v roce 1871 (Štoll, 2009). Chceme-li aplikovat tuto teorii, je třeba za vzduchové částice považovat nahodilé shluky atmosférických plynů a ne jednotlivé molekuly, jak se Rayleigh domníval (Kraus, 2009).

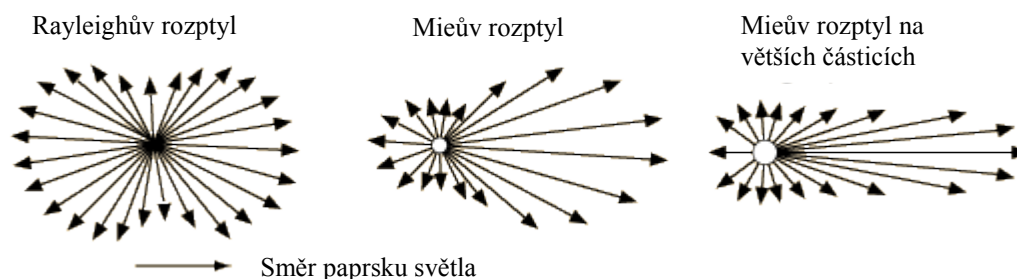
Intenzita Rayleighova rozptylu je proporcionální k hodnotě rozptylu světla ve zředěném plynu. Není úplně zřejmé, proč se postranní Rayleighův rozptyl snižuje se zvyšující se koncentrací plynu, je ovšem jasné, že vlnovou délkou je to ovlivněno minimálně (Rojo & Berman, 2010).

1.2.2.2. Mieův rozptyl

Jsou-li částice větší než vlnová délka, je závislost intenzity rozptylu světla na vlnové délce složitější. Touto teorií se zabýval Gustav Mie (1869-1957) ve své práci „Beiträge zur optik trüber meiden, speizell Kolloidaler Metallösungen“ v roce 1908,

kde popisuje tzv. Meiův rozptyl. Mají-li částice různou velikost (kapky mlhy, vody, krystalky ledu), jeví se rozptýlené světlo jako bílé (Kraus, 2009).

Rozdíl mezi Rayleighovým a Mieovým rozptylem je znázorněn na obrázku č. 2.



Obr. č. 2. Porovnání Rayleighova a Mieova rozptylu světla (Nave, 2005).

1.2.3. Extinkce

Nasvítíme-li částice aerosolu žárovkou, část světla se rozptýlí a část absorbuje, čímž dojde k zeslabení intenzity světelného záření. Tento proces je nazýván extinkce. Jedná se ale pouze o absorpci v ose záření. Díky extinkci jsme schopni se například dívat na Slunce, protože část slunečního záření je aerosolovými částicemi pohlcena.

Extinkční koeficient můžeme popsat jako sumu absorpčního koeficientu σ_a a koeficientu rozptylu σ_e (Hinds, 1999).

1.2.4. Viditelnost

V rámci optických vlastností nelze zanedbat viditelnost, která je součástí teorií o rozptylu a extinkce světelného záření. Je to veličina, která udává, s jakou jasností vidíme předměty v určité vzdálenosti. V praxi se jedná o nejvzdálenější předměty. Viditelnost je velmi ovlivněna rozptylem i extinkcí.

Viditelnost je ovlivněna dvěma faktory – ostrostí a kontrastem. Například hvězdy jsou v noci dobře viditelné, díky vysokému kontrastu mezi zářícími hvězdami a temnou noční oblohou. Stejně hvězdy by byly vidět i ve dne, nebýt částic, které rozptylují sluneční záření, čímž je kontrast snížen na nulu (Hinds, 1999).

2. Metodika měření rozptylu světla na atmosférickém aerosolu

2.1. Nephelometer

2.1.1. Seznámení, historie

Technikou nephelometrie se začali zabývat Beuttell a Brewer v roce 1949. Elektronicky ovládané nephelometry se začaly široce využívat pro atmosférické výzkumy v padesátých letech 20. století (Heintzenberg et al., 2006). Nephelometry, které již měřily na několika vlnových délkách, a staly se předchůdci dnešního TSI Nephelometeru, byly vynalezeny v roce 1969. Takzvaný vysoce citlivý integrační nephelometer (high-sensitivity integrating nephelometer – TSI nephelometer) byl standardizován v roce 1993. Vylepšení designu a technologií probíhalo více než dvě dekády.

Vzhledem k tomu, že se optické vlastnosti atmosférického aerosolu mění v závislosti na jeho chemických a fyzikálních vlastnostech, je vhodné, aby byly měřeny v průběhu času na různých lokalitách. Na takováto měření je TSI nephelometer dobře situován, zejména díky jednotné komerční produkci, relativně jednoduché obsluze a možnosti měření šesti důležitých parametrů (Anderson & Ogren, 1998).

Na základě výzkumu Anderson et al (1996) je TSI nephelometer vhodný pro měření submikronových částic, a to s přesností ± 10 %. Měření rozptylového koeficientu u náhodných plynů je limitováno zejména kalibrací, je-li provedena správně, je přesnost měření ± 1 %.

Díky využití šesti měřicích parametrů (dopředný a zpětný rozptyl, každý na třech vlnových délkách), lze měřit rozptyl světla s přesností cca 20 %. Pro částice akumulárního modu je malá, ale systematická tendence rozptylový koeficient u dopředného i zpětného rozptylu nadhodnocovat (Anderson et al., 1996).

Na podobném principu měří i nephelometer Aurora. Konkrétně model Ecotech Aurora 3000 porovnává s TSI nephelometerem ve své práci Müller et al (2011). Aurora 3000 na rozdíl od TSI nephelometeru využívá LED lampy – na jednu vlnovou délku, 3 lampy a měří v rozmezí úhlů 10 – 171° (Müller, Laborde, Kassell, & Wiedensohler, 2011).

2.1.2. Konstrukce a mechanismus

Nephelometer (obr. č. 2) je konstruován z odolných hliníkových částí. Hlavní konstrukce je složena z tenkostěnné hliníkové trubky o průměru 10 cm a délce zhruba 90 cm. Optický systém, který přijímá světlo, je umístěn na jednom konci hlavní trubky a na druhém konci je umístěna světelná past.

Turbínový ventilátor čerpá vzorek aerosolu skrz vstupní port, kde zároveň dochází k měření objemu vzorku. Následně je vzorek osvětlen halogenovou žárovkou. Světlo je vedeno difúzním opálovým sklem. Kombinace halogenového světla a eliptického dvojbarevného zrcadla zajišťuje minimální odchylku od ideální sinusoidy a minimální rozdíly mezi přístroji. Také je díky tomu odstraněna možnost selhání, která se vyskytovala u přístrojů využívajících LED lampy. V rozmezí úhlů 7 až 170° dochází k měření celkového rozptylu. V rozmezí úhlů 7-90° je měřen dopředný rozptyl a od 90° do 170° dochází k měření zpětného rozptylu. Rozptyl na vzorku je monitorován třemi fotonásobiči (photomultiplier tubes – PMTs) skrz sérii otvorů umístěných podél hlavní trubky. Rozptyl světla na aerosolu je snímán proti tmavému pozadí na velmi efektivní světelné pasti. Díky světelné pasti, otvorům a povrchu vnitřního prostoru nephelometru, který zajišťuje dobrou absorpci světla, je zajištěn nízký výchozí rozptyl světla od vnitřních stěn.

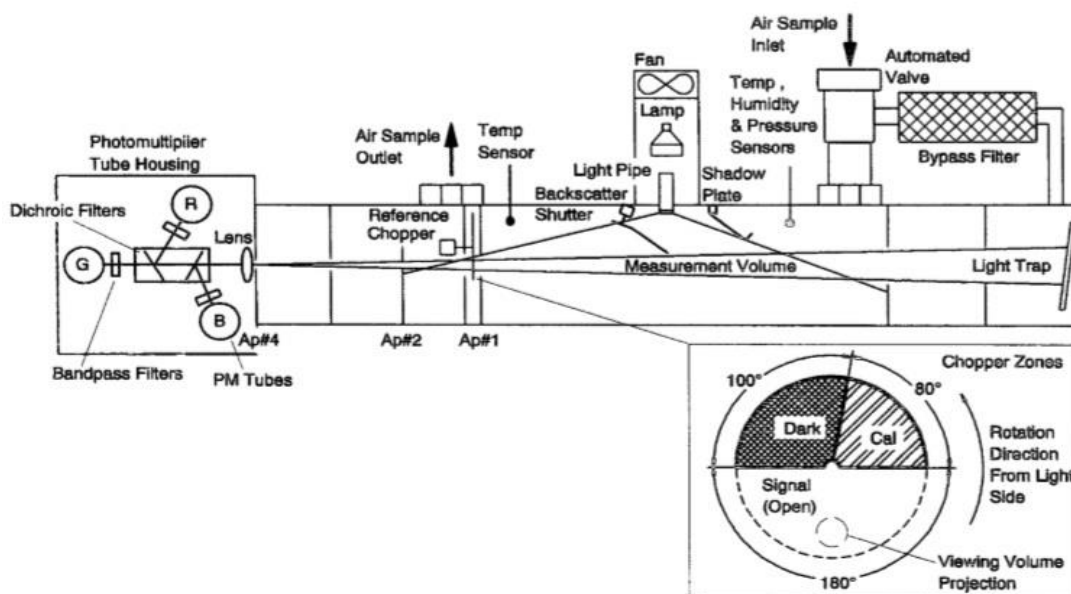
Rozptyl světla je rozdělen do tří barev díky využití horní a pásmové propustnosti barevných filtrů, které jsou umístěny v přední části PMT detektorů. Neustále rotující uzávěrka umožňuje tři módy detekce signálu. První mód měří rozptyl světla. Druhý mód blokuje veškeré další světlo a měří pomocí fotonásobičů tmavý proud, který je následně odečten od naměřeného signálu. Třetí mód spočívá ve vložení průsvitného portu do uzávěrky a zajišťuje přímou dráhu světelného signálu. Tímto způsobem nephelometer kompenzuje změny ze světelného zdroje.

Při měření zpětného rozptylu rotuje uzávěrka před zdrojem světla a blokuje světlo v úhlu od 7° do 90°. Jakmile je tento světelný vstup blokován, je na fotonásobiče přenášeno pouze světlo, které se rozptyluje ve zpětném směru. Zpětný rozptyl může být také vypočítán odečtením dopředného rozptylu od rozptylu celkového. Pokud není zpětný rozptyl požadován, je možné pozastavit uzávěrku na pozici měření celkového rozptylu.

Periodicky dochází k tzv. blankovacím epizodám. U přívodového ventilu je zabudovaná automatický ventil, která po přepnutí odvádí veškerý vzorek aerosolu na

velmi účinný filtr. Díky tomu dojde k měření čistého vzduchu. Zároveň však dochází k měření dopředného i zpětného rozptylu.

Vestavěný ohřívač vzorku minimalizuje kondenzaci vlhkého aerosolu na vnitřní stěny přístroje. Je-li vlhkosti vyšší, atmosférické částice jako jsou sulfáty či chlorid sodný, absorbují vodu a mohou podstoupit fázové přechody. Výsledkem pak může být změna velikosti částic, tvaru i refrakčního indexu. (Manual, 2005; TSI, 2012).



Obr. 2.: Schéma Integračního nephelometru 3561, TSI. Převzato z (Anderson et al., 1996)

2.1.3. Kalibrace

Pro správné měření rozptylových koeficientů je velmi důležitá kalibrace přístroje. Díky správné kalibraci lze měřit rozptyl světla s velmi vysokou přesností. Pro kalibraci je podstatné využít plyny se známým rozptylovým koeficientem, velikostí molekul a refrakčním indexem (Anderson et al., 1996).

Nejvhodnějšími kalibračními plyny jsou oxid uhličitý a vzduch, jejich pořízení je nejméně finančně náročné, manipulace s nimi nevyžaduje zvláštních bezpečnostních opatření a jejich koeficient rozptylu je velmi přesně znám (Anderson & Ogren, 1998).

2.1.4. Teorie integrace rozptylu

Při průchodu atmosférou je světlo oslabeno, jak udává Lambertův-Beerův zákon:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma_e L}, \quad (2)$$

kde L je vzdálenost světelného zdroje od částice, σ_e je velikost extinkčního koeficientu (m^{-1}), I je intenzita zdroje světla a I_0 je intenzita světla dopadajícího na částici (Bergmann et al., 1999; Hinds, 1999).

Celkový naměřený rozptyl $S_{ts,\lambda}$ a zpětný rozptyl $S_{bs,\lambda}$ měřený na určitých vlnových délkách lze zapsat jako:

$$S_{ts,\lambda} = \int_{0^\circ}^{180^\circ} F_\lambda(\theta) Z_{ts}(\theta) d\theta, \quad (3)$$

$$S_{bs,\lambda} = \int_{0^\circ}^{180^\circ} F_\lambda(\theta) Z_{bs}(\theta) d\theta, \quad (4)$$

kde $Z_{ts}(\theta)$ a $Z_{bs}(\theta)$ jsou funkce citlivosti na úhel a θ je samotný úhel. Pro kalibraci nephelometru s dvěma plyny o známých Rayleighových koeficientech rozptylu je zjištěna konstanta K , díky které může být zjištěn dopředný i zpětný koeficient rozptylu:

$$\sigma_{ts,\lambda} = K_{ts,\lambda} S_{ts,\lambda} - \sigma_{tsR,\lambda}, \quad (5)$$

$$\sigma_{bs,\lambda} = K_{bs,\lambda} S_{bs,\lambda} - \sigma_{bsR,\lambda}, \quad (6)$$

kde jsou hodnoty Rayleighova rozptylu $\sigma_{tsR,\lambda}$ a $\sigma_{bsR,\lambda}$ analyticky vypočítány pro daný tlak a teplotu, a jsou z rozptylového signálu odečteny (Müller et al., 2011).

Funkce pro úhlovou citlivost nephelometru pak může být pro celkový rozptyl dána jako:

$$Z_{ts}(\theta) = \sin(\theta), \quad (7)$$

a pro zpětný rozptyl jako:

$$Z_{bs}(\theta) = \begin{cases} \sin(\theta) & 90^\circ < \theta < 180^\circ \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}. \quad (8)$$

Vypočtené koeficienty z rovnic 4-8 jsou označovány jako *skutečný koeficient rozptylu* σ_{ts}^{true} a *skutečný koeficient zpětného rozptylu* σ_{bs}^{true} . Anderson and Orgen (1998) definovali poměry mezi skutečnými koeficienty rozptylu a mezi hodnotami naměřenými pomocí nephelometru takto:

$$C_{ts,\lambda} = \frac{\sigma_{ts,\lambda}^{true} \sigma_{tsR,\lambda}^{neph}}{\sigma_{ts,\lambda}^{neph} \sigma_{tsR,\lambda}^{true}} \quad (9)$$

$$C_{bs,\lambda} = \frac{\sigma_{bs,\lambda}^{true} \sigma_{bsR,\lambda}^{neph}}{\sigma_{bs,\lambda}^{neph} \sigma_{bsR,\lambda}^{true}}. \quad (10)$$

Druhý koeficient v obou rovnicích kompenzuje neideální funkci osvětlení, která nastává při kalibraci s Rayleighovskými rozptylovými plyny (Anderson & Ogren, 1998; Müller et al., 2011)

2.2. Zpracování dat

2.2.1. Popis lokality, sběr dat

Měření probíhalo v observatoři v Košeticích ($49^{\circ}33'31.15''$ N $15^{\circ}6'58.98''$ E) v okrese Pelhřimov na Vysočině (Obr. č. 3). Observatoř spadá pod ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) a byla založena v roce 1988 jako specializované pracoviště pro dlouhodobý monitoring kvality ovzduší. Observatoř představuje venkovskou pozadřovou stanici a získané výsledky tedy představují hodnoty charakterizující rozsáhlé území bez přímého antropogenního znečištění. Od poloviny roku 2012 je zde umístěn TSI Nephelometer pro měření rozptylu světla.

Sběr dat byl rozdělen do 2 let – 2013 a 2014 (od 1. 1. 2013 – 31. 12. 2013 a 1. 1. 2014 – 31. 12. 2014) a v současné době měření stále pokračuje. Aerosol, na kterém probíhalo měření, byl vzorkován pomocí odběrové hlavy PM10, data byla měřena v minutových a pětiminutových intervalech. Získaná data nejsou kvůli několika faktorům (zejména nefunkční žárovka, blankovací epizody atd.) zcela kompletní, tzn., nepokrývají kompletně celé období, které je v této práci zpracováváno. Ale i přes to je nashromážděno velké množství dat, ze kterých již lze vyvodit první výsledky. Pro rok 2013 bylo k dispozici ke zpracování 22,1 % dat a pro rok 2014 téměř 70 % (69,1 %). Pro oba roky to tedy činí zhruba 45,6 % použitelných dat.



Obr. č. 3. Lokace meteorologické observatoře v Košeticích (Google maps, www.maps.google.com)

2.2.2. Použité vzorce a veličiny

Při zpracování byly použité základní vzorce pro výpočet Angstroemova koeficientu, korigovaných dat a dále statistické vzorce pro výpočty jednotlivých chodů.

Reciproký metr

Základní veličinou, ve které se měří rozptylový koeficient je tzv. reciproký metr, zn. m^{-1} (Heintzenberg et al., 2006). Reciproký metr je jednotka tzv. vlnočtu, který je převrácenou hodnotou vlnové délky a je roven počtu vln dopadajících na jednotku délky.

Angstroemův exponent

Hodnota Angstroemova exponentu atmosférického aerosolu se vypočítá podle vzorce č. 11:

$$\tilde{a} = - \frac{\log\left(\frac{\sigma_{sp453}}{\sigma_{sp554}}\right)}{\log\left(\frac{\lambda_{453}}{\lambda_{554}}\right)}, \quad (11)$$

kde σ je koeficient rozptylu na dané vlnové délce λ (Massoli et al., 2009).

Hodnota Angstroemova exponentu by se měla pohybovat v rozmezí od 1 do 1,5 a běžně se využívá jako indikátor převládající velikosti aerosolů, a k popisu závislosti optické šířky nebo extinkčního koeficientu na vlnové délce. Pouze v extrémních případech je vyšší, či nižší (Ångström, 1929).

Pro zpětný i dopředný rozptyl je Angstroemův exponent počítán z rozptylových koeficientů na dvou vlnových délkách, poté ale lze dopočítat jakoukoliv další vlnovou délku λ_x podle vzorce:

$$\sigma_{\lambda_x} = \sigma_{\lambda_{1,2}} \left(\frac{\lambda_{1,2}}{\lambda_x} \right)^{\alpha_{1,2}}, \quad (12)$$

kde σ_λ je rozptylový koeficient pro vlnovou délku λ_x . $\lambda_{1,2}$ jsou známé vlnové délky a α je hodnota Angstroemova koeficientu vypočtená z měření na těchto vlnových délkách (Müller et al., 2011).

Z výpočtu Angstroemova exponentu (rovnice č. 11) lze vyvodit zejména představu o velikosti částic. Čím vyšší je Angstroemův koeficient, tím menší je aerodynamický průměr částic (Ångström, 1929).

Angstroemův exponent je také veličina, používaná ke korekci dat podle rovnice č. 13.

2.2.3. Metodika zpracování dat

Před vlastním zpracováním naměřených dat bylo nejprve důležité vyfiltrovat chybná data. V některých časových úsecích nebyla funkční žárovka, tím pádem nebyla data dostupná. Dále byla vyfiltrována data se zápornou hodnotou koeficientů rozptylu a data z blankovacích epizod, během kterých nephelometer přepne mezi vzorkem a čistým vzduchem (nebo obráceně). Místo těchto dat byla dosazena hodnota -999 a v celkovém zpracování se hodnoty nebraly v úvahu.

Nephelometer měřil data v minutových a pětiminutových intervalech, bylo tedy nutné zkontrolovaná data zprůměrovat do pětiminutových intervalů.

Před vlastním statistickým zpracováním bylo dále nutné vypočítat Angstroemův koeficient a data zkorrigovat.

2.2.3.1. Korekce

Limitujícím faktorem veškerých měření je přesnost měřících přístrojů a metod, tyto nepřesnosti mohou představovat zásadní chyby ve veškerých výzkumech. K nesprávnému měření vlivem ovlivnění citlivosti nephelometeru přispívají dva faktory. Jedním je tzv. „truncation error“, tedy chyba ze zanedbání rozptylu pod úhlem menším než 7° a větším než 170° , a „ne-lambertovské“ chyby, jež jsou způsobeny mírnou „nekosinovou“ distribucí intenzity světla, zajišťovanou difúzním opálovým sklem (Anderson & Ogren, 1998).

Další nepřesnosti a systematické chyby, jako je například citlivost na vlnovou délku mohou vést k nejistotám v naměřených koeficientech (Massoli et al., 2009). V závislosti na velikosti částic se rozmezí těchto chyb pohybuje od 5 do 50 % (Anderson & Ogren, 1998; Anderson et al., 1996). Veškeré chyby byly zaznamenány a byly pro ně vyvinuty korekce.

Korekční faktor C můžeme definovat jako:

$$C = \frac{\sigma_{true}}{\sigma_{neph}}, \quad (13)$$

kde σ_{true} je koeficient vypočítaný v Mieově teorii pro $0-180^\circ$ nebo $90-180^\circ$ a σ_{neph} je odvozen z modifikovaného Mieova integrálu, využívající citlivosti nephelometeru. Pro výpočet korekčního faktoru je podstatné vzít v úvahu kalibraci, protože díky

kalibraci jsou napravovány nepřesnosti, které vznikají při měření nephelometrem na základě Rayleighovy rozptylové teorie.

Pro částice menší než 5 μm se s velikostí částice zvyšuje podíl rozptýleného světla v její těsné blízkosti. Nephelometer tento jev nedokáže zachytit, a tak dochází k chybě v měření. Pro tuto chybu je vhodné využít korekci pro celkový rozptyl, C_{ts} . Ovšem pouze za předpokladu, že refrakční index je konstantní a je široká distribuce velikostí částic.

Kvůli měření na třech vlnových délkách je měření rozptylu citlivé na velikosti částic, z tohoto důvodu je vhodné v korekci využít Angstroemův exponent (rovnice č. 11).

Korekční faktor zpětného rozptylu je na rozdíl od celkového rozptylu vždy poměrně blízko původní hodnotě a nedochází k jeho monotónnímu vzrůstu při zvyšující se velikosti částic (graf č. 1). Je to způsobeno zejména úhlem, pod kterým je zpětný rozptyl měřen. Na 90° dochází k nedokonalé separaci světla a na 180° zase nedochází k jeho snímání (Anderson & Ogren, 1998).

Pro výpočet korekčního faktoru byl využíván následující vzorec, který byl převzat z práce Massoli et al., 2009:

$$C = \text{MAX}\{1.0, v_0 + v_1 \exp(v_2 * (3.25 - \lambda))\}, \quad (14)$$

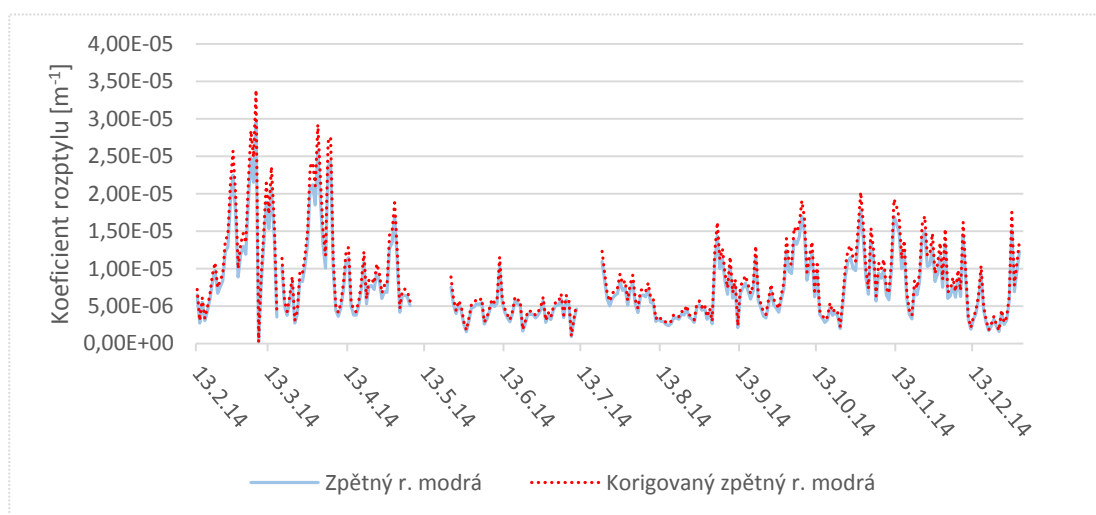
kde C je korekční faktor, v_0 , v_1 a v_2 a jsou korekční koeficienty (viz tabulka č. 1) a λ je hodnota Angstroemova exponentu, který byl vypočítán podle vzorce č. 11.

Na základě Mieovy teorie byly v práci Massoli et al (2009) vypočítány korekční koeficienty, které jsou vhodné pro korekci koeficientů rozptylu měřených na třech vlnových délkách (698 nm, 554 nm a 453 nm) pomocí TSI 3563 nephelometeru.

	v_0	v_1	v_2	v_3
698 nm sub-μm	0,8627	0,1423	0,1816	0,0306
554 nm sub-μm	0,8511	0,1589	0,2153	0,0439
453 nm sub-μm	0,8863	0,1327	0,2758	0,0610
698 nm all	0,9868	0,0182	0,7980	
554 nm all	0,9948	0,0152	0,8951	
453 nm all	1,0072	0,0118	1,0036	

Tabulka č. 1. Koeficienty pro výpočet korekčního faktoru, stanovené pro TSI 3563 nephelometer, který měří ve vlnových délkách 453, 554 a 698 nm. Převzato z Massoli et al., 2009

Prvním krokem provedení korekce bylo zlogaritmování veškerých dat (dopředného i zpětného rozptylu) a vlnových délek, na kterých měření probíhalo (453 nm – modrá, 554 nm – zelená a 698 nm – červená). Následně byla zlogaritmovaná data dosazena do vzorce pro výpočet Angstroemova koeficientu (rovnice 11). Následoval výpočet korekčního faktoru podle rovnice 14. Ve zpracování byly využívány koeficienty ze spodní části tabulky, tedy 698-453 nm all, které jsou určeny pro aerosol typu PM10. V horní části tabulky jsou koeficienty určené pro výpočet korekčního faktoru pouze submikronových částic. Pro výpočet korigovaných dat bylo ještě potřeba vynásobit původní naměřenou hodnotu jejím korekčním faktorem dle rovnice 13. Výsledná data, tzv. korigovaná, byla následně statisticky zpracována a dosazena do grafů, aby byl znázorněn chod rozptylu v jednotlivých vlnových délkách v daném období.



Graf č. 1. Znáznornění rozdílu mezi naměřenými a korigovanými hodnotami v roce 2014 pro rozptyl na modré vlnové délce (453 nm)

2.2.4. Statistické zpracování dat

Stejně jako výpočet korekčních faktorů, bylo i statistické zpracování prováděno v programu Microsoft Excel a bylo prováděno pro oba kalendářní roky.

Pro statistické zpracování byla využívána korigovaná data, pouze u některých grafů byla využita i data naměřená, pro lepší představu, jak se data korekcí změnila, či nezměnila (viz graf č. 1). Byly vypočítány a statisticky zpracovány další časové závislosti rozptylu – denní a roční chody a časová závislost rozptylu v jednotlivých.

Pro detailnější znázornění průběhu koeficientu rozptylu v čase byly vypočteny denní průměry pomocí funkce AVERAGEIFS. Do funkce bylo nutné zadat kritéria

pro výpočet průměru. Vzorec po zadání všech potřebných parametrů vypadal zhruba takto:

=AVERAGEIFS(Modrá ; Dny ; ">="&1.1.2013 00:00 ; dny ; "<"&2.1.2013 00:00)

Na pozici „modrá“ byl označen celý sloupec s naměřenými hodnotami v dané vlnové délce. Dny jsou zdroj kritérií, tzn. sloupec s kalendářním rokem po jednotlivých dnech. Následují kritéria (pro každé musí být zdroj kritérií označen zvlášť). Kritériem byl vždy jeden den – tedy větší a rovno než například 1.1.2013 00:00 a menší než například 2.1.2013 00:00. Následně byly takto vypočteny denní průměry pro všechny vlnové délky. Tyto průměry byly vhodné zejména pro detailnější roční a dvouletou řadu, jak je vidět na grafu č. 2. Stejným způsobem byl také vypočítán roční chod Angstroemova koeficientu. Hodnoty byly vykresleny do ročních a dvouletých řad.

Pro znázornění rozptylu světla v průběhu dne byly vytvořeny také grafy pro denní chod (graf č. 9 a 10). Hodnoty byly vypočítány pomocí funkce AVERAGEIF, do které se dosazovalo obdobné kritérium, jako do funkce AVERAGEIFS.

Byly vypočítány a graficky zpracovány percentily. Nejvhodnější se jevílo vypočítat percentily pro roční řadu po měsících a pro znázornění denního chodu po jednotlivých hodinách. Byla použita základní funkce PERCENTIL. Maticí byl vždy jeden kalendářní měsíc a kritérium požadovaný percentil, tedy 0,25 pro 1. kvartil, 0,75 pro 3. kvartil a medián. Z výsledných dat byly sestaveny grafy ročních chodů pro každou vlnovou délku zvlášť, a to pro oba kalendářní roky.

3. Výsledky a diskuze

V České republice se jedná zatím o unikátní měření. Bohužel nejsou data kvůli výpadkům přístroje úplná. Za rok 2013 není dostupná velká část dat zejména pro podzimní až zimní měsíce koncem roku (cca od listopadu). V průběhu roku dále chybí data z měsíce dubna a pár dalších kratších epizod v letních měsících. V roce 2014 jsou data již kompletnější. Chybí však začátek roku (cca do poloviny února) a pak 2 kratší úseky v období dubna a července.

3.1. Průměrné hodnoty

Ačkoli je pro rok 2013 k dispozici méně než polovina dat oproti roku 2014, tak se průměrné hodnoty a medián pro oba roky příliš neliší. Průměrná hodnota rozptylu světla pro rok 2013 je při vlnové délce 453 nm $17,8664 \text{ Mm}^{-1}$ a pro rok 2014 je $17,7762 \text{ Mm}^{-1}$ (tabulka č. 2).

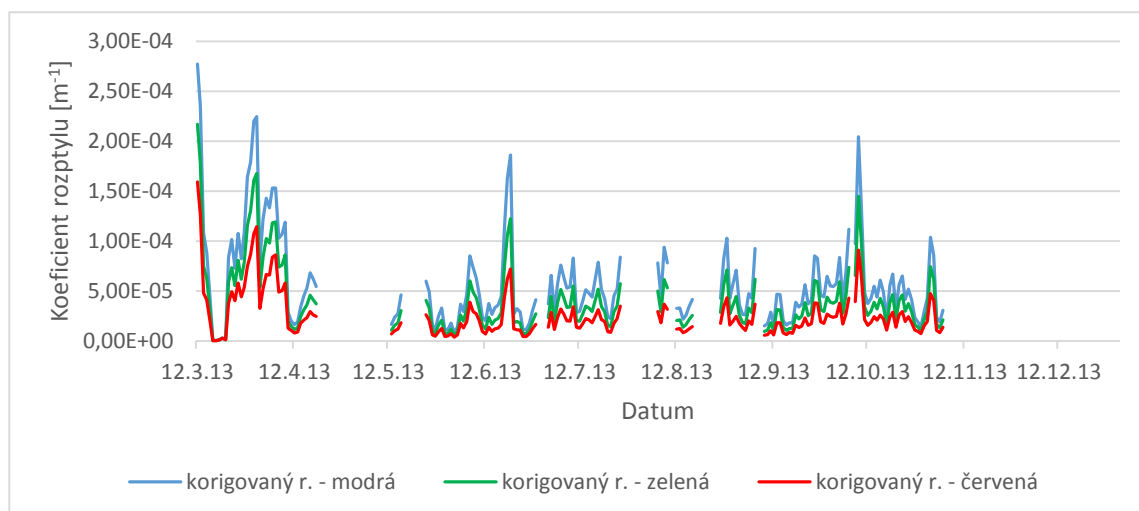
Hodnoty pro medián se mírně liší, ale opět to není, stejně jako v případě průměru, veliký rozdíl. Dopředný rozptyl se liší v rámci obou let cca o $0,5 \text{ Mm}^{-1}$, u zpětného rozptylu je rozdíl v rámci setin.

		2013		2014	
Rozptyl	Vlnová délka	Průměr	Medián	Průměr	Medián
Dopředný rozptyl [Mm^{-1}]	Modrá	17,8664	14,4192	17,7762	15,0560
	Zelená	10,2008	7,7373	10,5324	8,3676
	Červená	5,5381	3,8942	5,7934	4,2805
Zpětný rozptyl [Mm^{-1}]	Modrá	1,4169	1,1610	1,4103	0,1154
	Zelená	0,9812	0,7833	0,9970	0,8041
	Červená	0,7432	0,5632	0,7690	0,5972

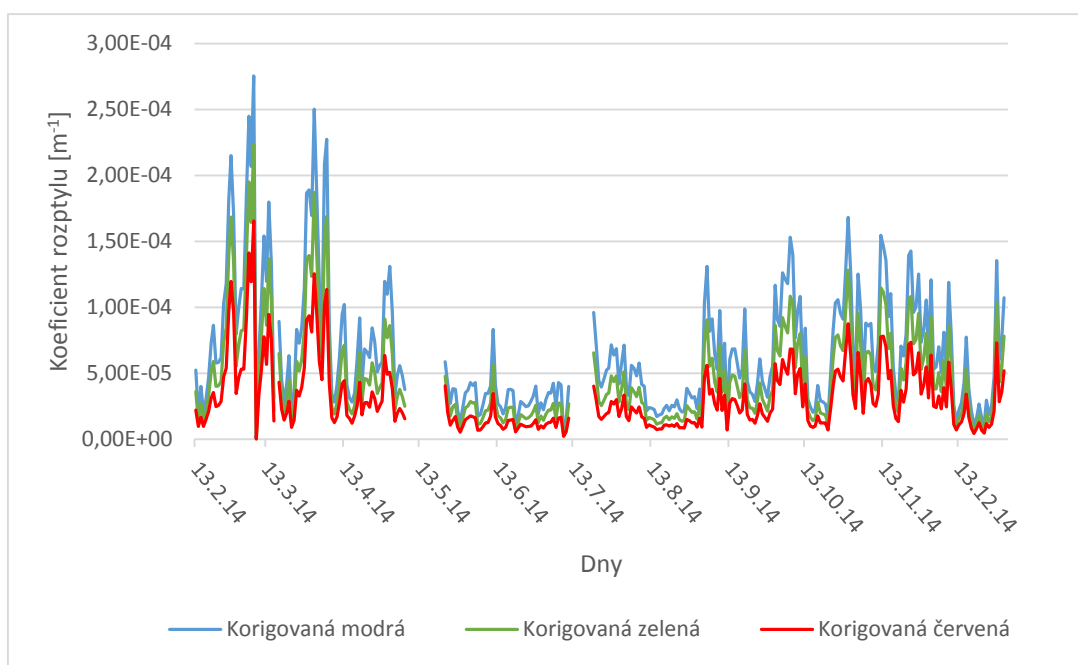
Tabulka č.2. Hodnoty průměru a mediánu za oba kalendářní roky, ve třech vlnových délkách - 453 nm (modrá), 554 nm (zelená) a 698 nm (červená) pro dopředný a zpětný rozptyl

3.2. Průběh v čase

Z grafu závislosti koeficientu rozptylu a čase v roce 2013 (Graf č. 2) lze vyčíst, že během roku došlo ke krátkým epizodám, kdy byl rozptyl výrazněji vyšší. Jedná se zejména o období března. Následně pár dní v polovině června a v první polovině října.



Graf č. 2. Časový průběh rozptylu světla na atmosférickém aerosolu za rok 2013. Měřeno na třech vlnových délkách - 453nm (modrá), 554nm (zelená) a 698nm (červená)

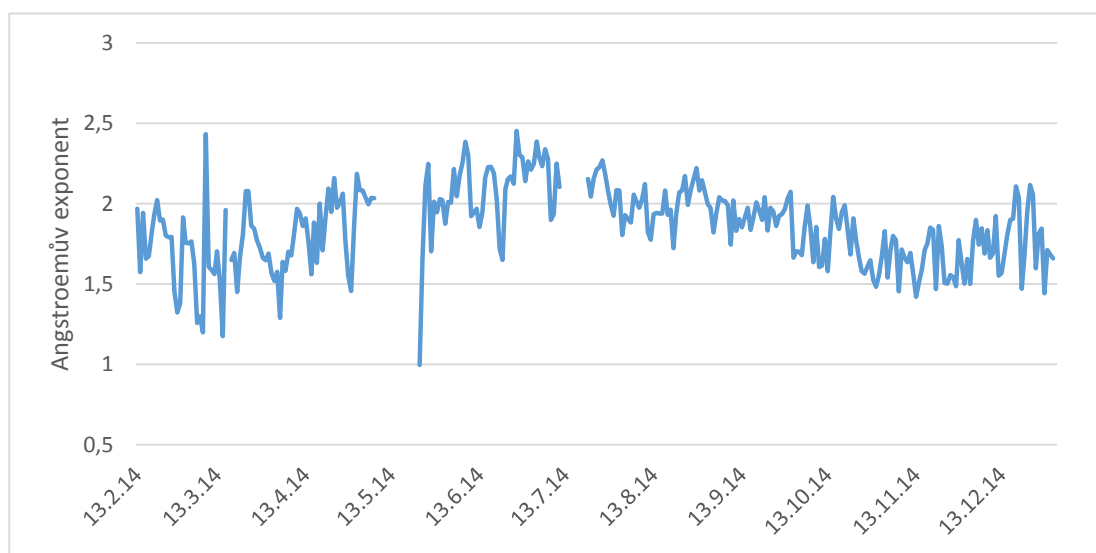


Graf č. 3. Časový průběh rozptylu světla na atmosférickém aerosolu za rok 2014. Měřeno na třech vlnových délkách - 453nm (modrá), 554nm (zelená) a 698nm (červená)

Druhý kalendářní rok, tedy rok 2014, kdy probíhalo měření od 1. 1. 2014 do 31. 12. 2014, je mnohem kompletnější, jak je vidět na grafu č. 3. Zde si můžeme všimnout vyšších výkyvů zejména v jarních a podzimních měsících, kde se naměřené hodnoty dostávají až k 25 Mm^{-1} . V letních měsících je rozptyl méně než poloviční. Vysvětlit by se to dalo množstvím znečišťujících příměsí v ovzduší. Vzhledem k tomu, že se nephelometer nachází v oblasti mimo větší město, tedy ve vesnické oblasti, kde

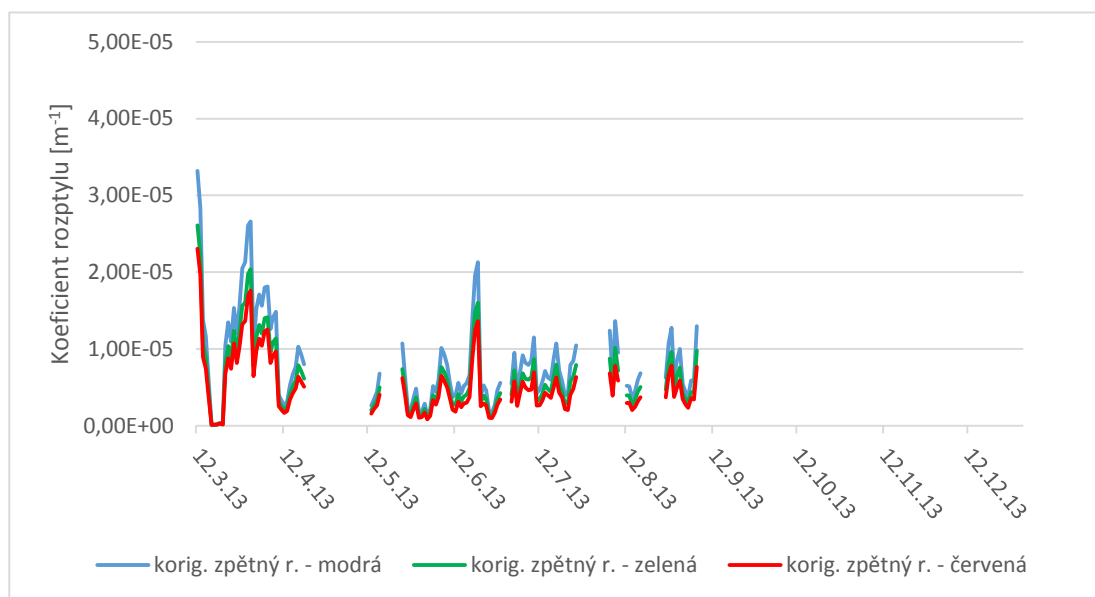
se častěji vytápí tzv. malými zdroji, může se koncentrace aerosolových částic v ovzduší v zimě zvýšit až o 35 % (Horák et al., 2011).

Z grafu č. 4, ve kterém je znázorněn průběh Angstroemova exponentu v čase, můžeme vypožorovat, jak se měnila velikost částic, na kterých byl rozptýl světla měřen. Je-li Angstroemův koeficient menší než 1, jedná se převážně o aerosol hrubšího modu. Pokud je exponent vyšší než 1, jedná se o jemný aerosol (Gopal et al., 2014). Vzhledem k této tezi a k výsledkům znázorněných v grafu č. 4 je zřejmé, že velikostní složení částic měřeného aerosolu spadá především do jemné frakce. Průměrná hodnota Angstroemova koeficientu byla pro rok 2013 1,89 a medián 1,93. Pro rok 2014 byla vypočtena průměrná hodnota 1,86 a medián 1,87.



Graf č. 4. Znázornění časové závislosti Angstroemova koeficientu pro rok 2014.

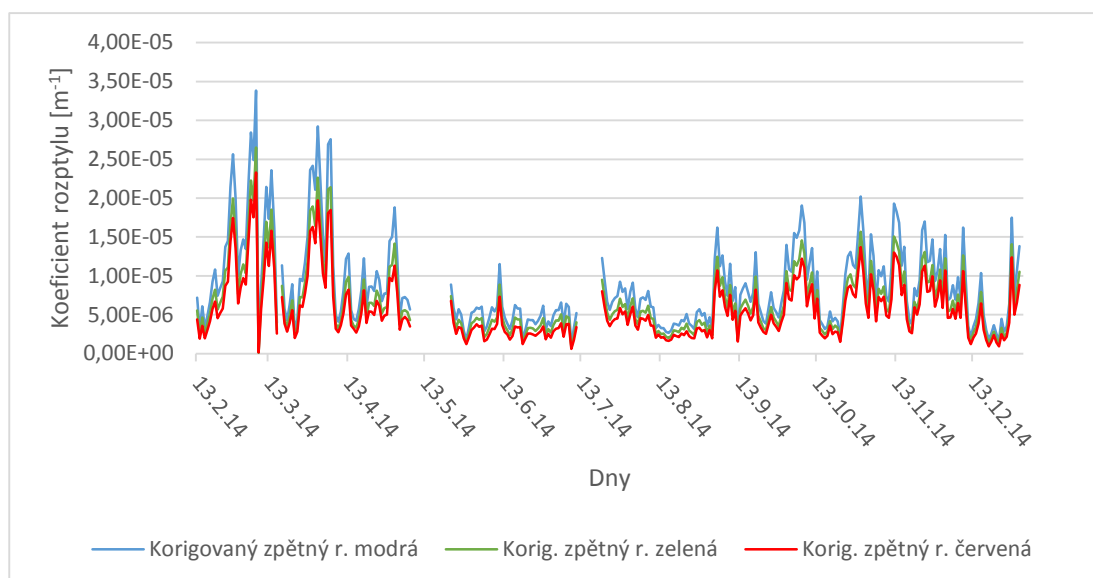
Na grafu č. 5 lze vidět roční chod zpětného rozptylu, konkrétně pro rok 2013. Data pro zpětný rozptýl jsou ještě méně kompletní, než pro rozptýl dopředný. Chybí celý konec roku zhruba od poloviny září. Zatímco dopředný rozptýl se v tomtéž roce pohyboval kolem 5 Mm^{-1} u zpětného rozptylu se pohybujeme kolem 1 Mm^{-1} . Maximální hodnoty byly naměřeny v březnu, konkrétně 12. 3. 2013 byl koeficient rozptylu $3,3 \text{ Mm}^{-1}$.



Graf č. 5. Časová závislost zpětného rozptylu světla na atmosférickém aerosolu pro rok 2013. Měřeno na třech vlnových délkách - 453nm (modrá), 554nm (zelená) a 698nm (červená).

Stejně jako pro rok 2013, byl vytvořen graf znázorňující roční chod zpětného rozptylu i pro rok 2014 (graf č. 6). Stejně jako dopředný rozptyl je i tento mnohem kompletnější. Hodnoty v grafu se pohybují stejně jako pro rok 2013 kolem 1 Mm^{-1} . Maximální koeficient rozptylu byl naměřen 8. 3. 2014 s hodnotou $3,38 \text{ Mm}^{-1}$ a hned následující den byl naměřen minimální koeficient rozptylu $0,0201 \text{ Mm}^{-1}$. Je ovšem důležité brát v potaz, že tyto hodnoty jsou zprůměrované po jednotlivých dnech. Mohlo tedy v průběhu roku dojít k naměření jak nižší, tak i vyšší hodnoty. V grafu č. 21 je znázorněna časová závislost rozptylu světla pro oba roky a v grafu č. 22 je znázorněn zpětný rozptyl.

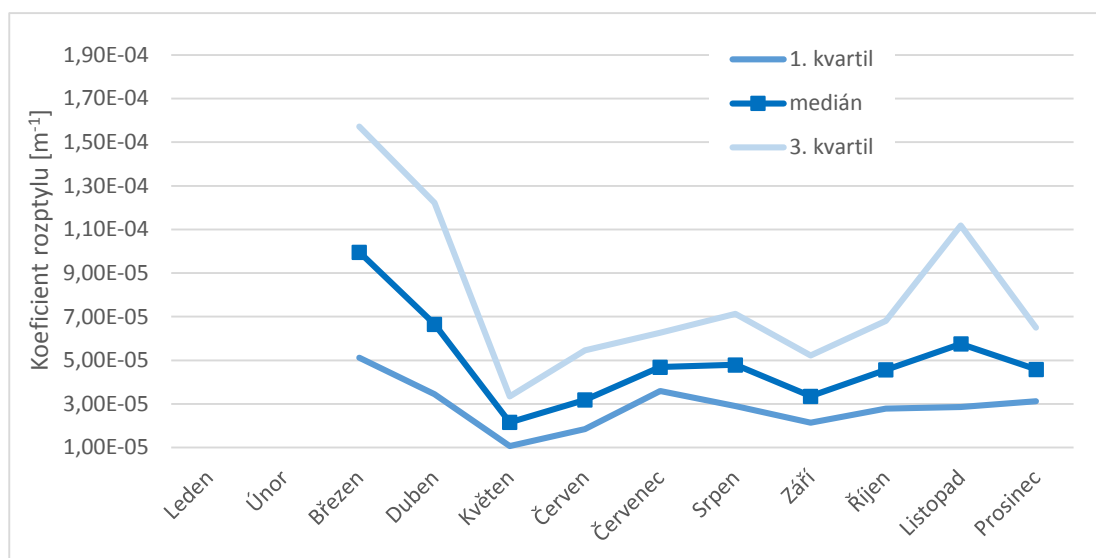
Vyšší naměřené hodnoty zpětného rozptylu odpovídají jemnější frakci aerosolu, což souhlasí i s výše uvedeným tvrzením u Angstroemova exponentu.



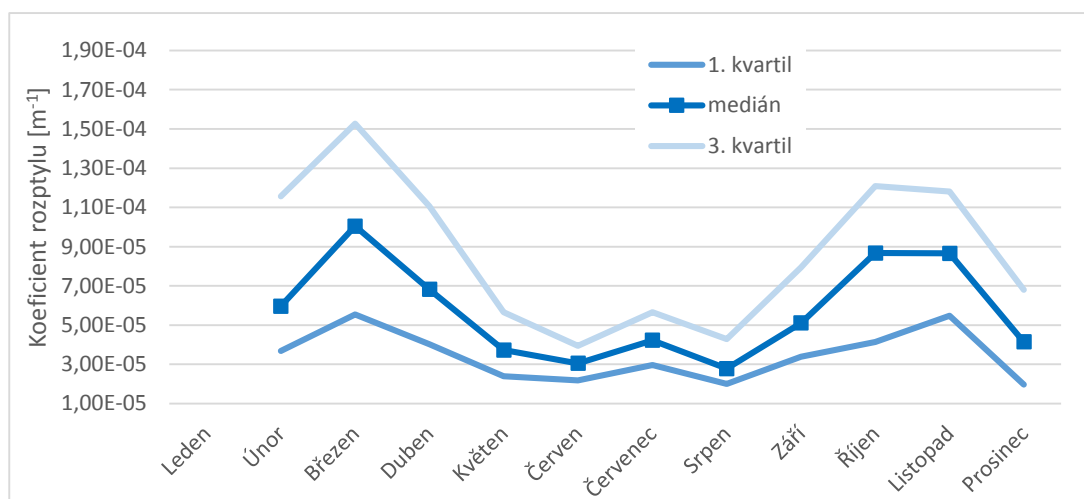
Graf č. 6. Časová závislost zpětného rozptylu světla na atmosférickém aerosolu pro rok 2014. Měřeno na třech vlnových délkách - 453nm (modrá), 554nm (zelená) a 698nm (červená).

3.3. Roční chod

V Grafu číslo 7 a 8 je znázorněn roční chod koeficientu rozptylu se znázorněním mediánu a interkvartilového rozptylu (1. – 3. kvartil). V Grafu č. 7 je percentil pro rok 2013 na modré vlnové délce – 453nm. Pro další vlnové délky jsou grafy k nahlédnutí v přílohách. Na grafu můžeme vidět 1. kvartil, který představuje hodnotu percentilu 25 %, medián – 50 % a 3. kvartil – 75%. V začátku roku byly naměřeny hodnoty s jak hodně velkým, tak s nižším rozptylem, jak si lze všimnout i na grafu č. 1. Proto je interkvartilové rozpětí dat velké. Naopak v letních měsících byly naměřeny spíše střední hodnoty rozptylu – fluktuace nebyla příliš veliká. Stejně to platí i pro kalendářní rok 2014, který je znázorněn v grafu č. 5. Zvláštní je ovšem prudký pokles hodnot koeficientů rozptylu v obou letech v prosinci, který bude pravděpodobně způsoben nedostatečným množstvím dostupných dat. Ze stejného důvodu také chybí v obou grafech začátek roku, pro rok 2013 není znám percentil pro leden a v roce 2014 pro leden a únor.



Graf č. 7 Roční chod koeficientu rozptylu v mediánu a 1. a 3. kvartilu pro kalendářní rok 2013.
Rozptyl na modré vlnové délce (453nm).



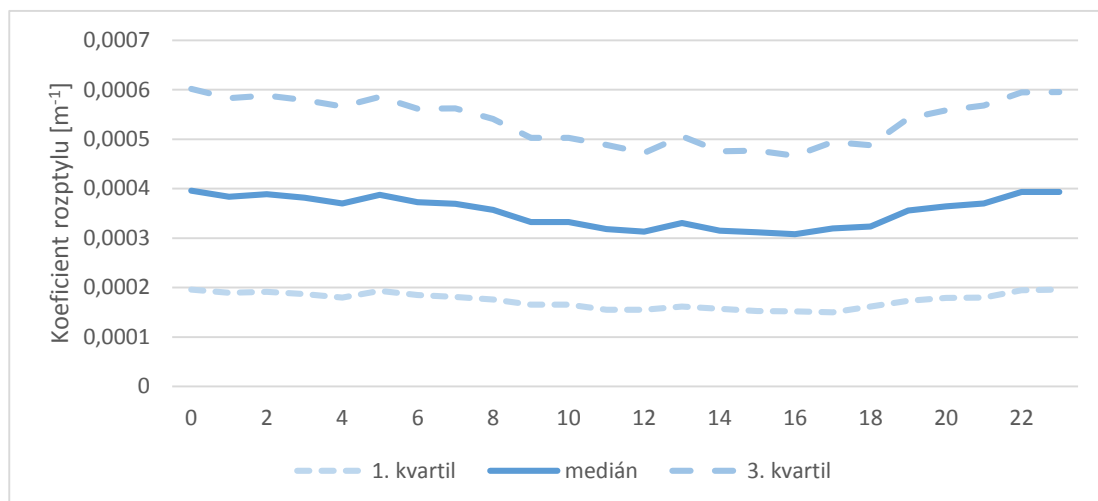
Graf č. 8 Roční chod koeficientu rozptylu v mediánu a 1. a 3. kvartilu pro kalendářní rok 2014.
Rozptyl na modré vlnové délce (453nm).

Byly také graficky znázorněny dvouleté chody pro každou vlnovou délku zvlášť, a to v grafu č. 23, 24 a 25.

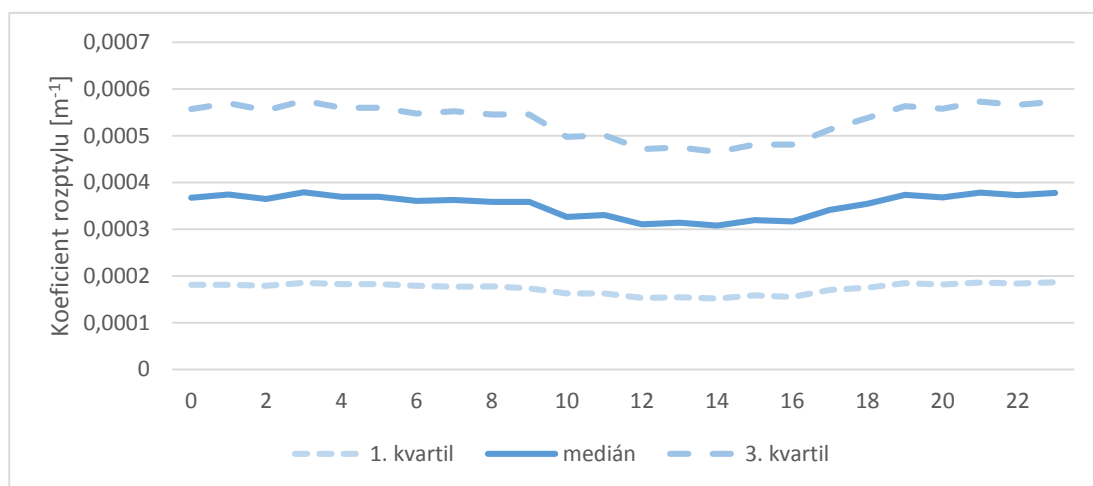
3.4. Denní chod

Na grafech č. 9-20 je znázorněn denní průběh rozptylu světla na atmosférickém aerosolu. Je zřejmé, že poměr vyššího a nižšího koeficientu rozptylu se během dne nijak výrazně neliší a dochází k minimální fluktuaci. Během poledních až odpoledních hodin se množství rozptylu mírně sníží a k večeru dochází opět k nárůstu. V prvním kvartilu se pokles projevil nejméně, nejvíce naopak ve třetím kvartilu. Obdobně tomu

bylo v obou letech, pouze v roce 2014 (graf č. 10) byla fluktuace ještě o něco menší. Pokles byl mírnější, ale následoval strmější vzrůst (oproti poklesu).



Graf č. 9. Denní chod rozptylu světla v roce 2013 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 453 nm (modrá).



Graf č. 10. Denní chod rozptylu světla v roce 2014 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 453 nm (modrá).

4. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala optickými vlastnostmi aerosolů a zejména rozptylem světla a jeho měřením pomocí TSI 3563 nephelometeru. Následovalo praktické zpracování v České republice unikátních dat a vypočítání základních parametrů jako byl Angstroemův koeficient, průměr a medián. Výsledné hodnoty byly graficky promítnuty a okomentovány.

Pomocí základních statistických funkcí byly vypočteny roční a denní chody a časové závislosti. Bylo zjištěno, že během roku docházelo k významným epizodám, kdy byly hodnoty rozptylového koeficientu značně vyšší oproti ostatním obdobím (zejména zimní měsíce). Ačkoli bylo k dispozici pouze necelých 50% dat (za dva kalendářní roky), dala se například vyhodnotit přibližná velikost aerosolu, na kterém byl rozptyl světla měřen.

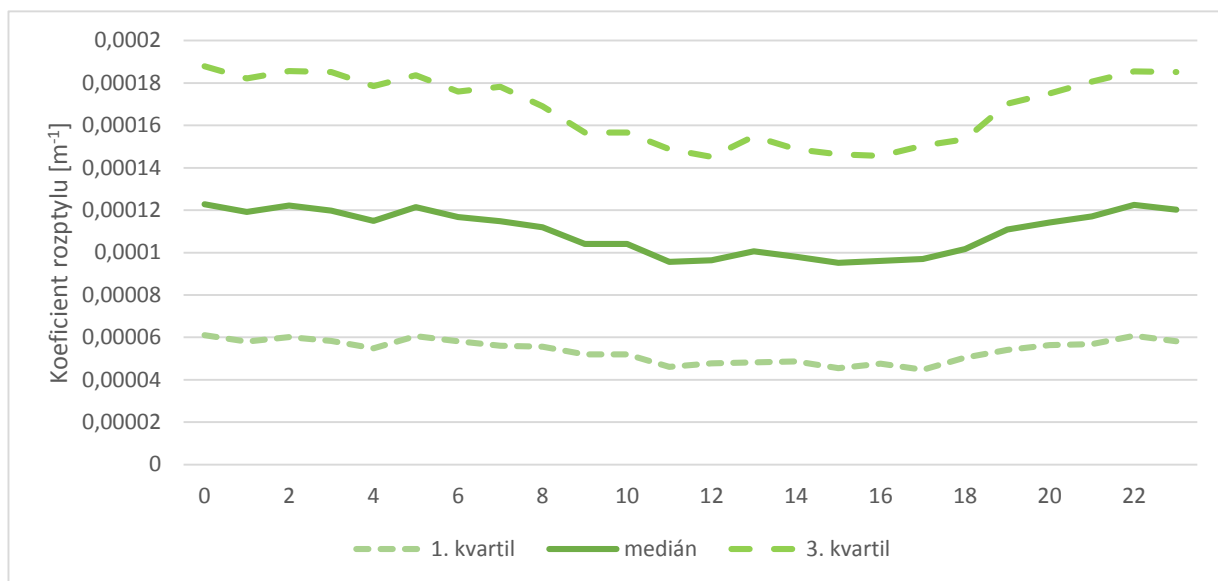
Tato práce slouží jako podklad pro podrobnější analýzu dat, která může dále zjišťovat například závislosti rozptylu světla na částicích atmosférického aerosolu na teplotě, vlhkosti, tlaku vzduchu nebo dokonce oblačnosti. Aby však mohly být tyto závislosti zkoumány, je zapotřebí podrobnějšího monitoringu meteorologických aspektů, jako je například venkovní teplota, úhrn srážek, rychlost větru a podobně.

5. Literatura

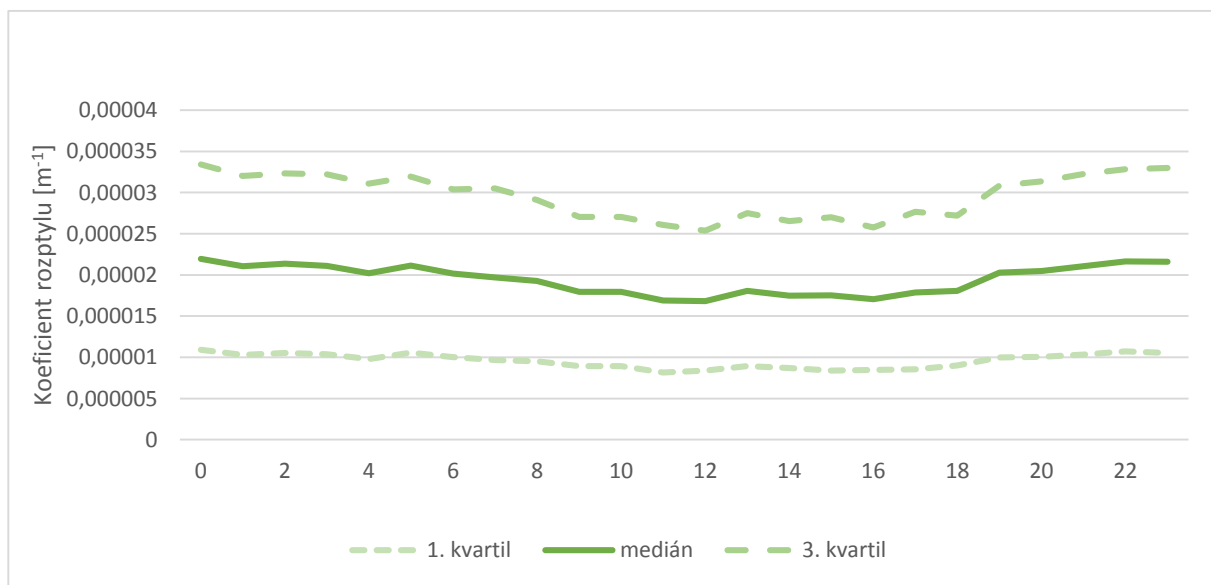
- Anderson, T. L., Covert, D. S., Marshall, S. F., Lauck, M. L., Charlson, R. J., Waggoner, A. P., ... Bates, T. S. (1996). Performance Characteristic of a High-Sensitivity, Three-Wavelength, Total Scatter/Backscatter Nephelometer, 13, 967–985.
- Anderson, T. L., & Ogren, J. A. (1998). Determining Aerosol Radiative Properties Using the TSI 3563 Integrating Nephelometer. *Aerosol Science and Technology*. doi:10.1080/02786829808965551
- Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, 11(1929), 156–166. doi:10.2307/519399
- Bergmann, L., Niedrig, H., & Schaefer, C. (1999). *Optics of Waves and Particles*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Dohányosová, P., Kubincová, L., Smolík, J., Schwartz, J., & Ždímal, V. (2007). *Výkladový slovník aerosolových termínů*. Praha: Česká aerosolová společnost. Retrieved from <http://cas.icpf.cas.cz/aerosolovnik.php>
- Gigahertz-Optik. (2015). Retrieved from <http://light-measurement.com/>
- Gopal, K. R., Arafath, S. M., Lingaswamy, a. P., Balakrishnaiah, G., Pavan Kumari, S., Uma Devi, K., ... Suresh Babu, S. (2014). In-situ measurements of atmospheric aerosols by using Integrating Nephelometer over a semi-arid station, southern India. *Atmospheric Environment*, 86, 228–240. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.12.009
- Heintzenberg, J., Wiedensohler, a., Tuch, T. M., Covert, D. S., Sheridan, P., Ogren, J. a., ... Havlicek, M. (2006). Intercomparisons and Aerosol Calibrations of 12 Commercial Integrating Nephelometers of Three Manufacturers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(7), 902–914.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurement of airborne particles - Second Edition* (second.).
- Horák, J., Hopan, F., Šyc, M., Machálek, P., Krpec, K., Ocelka, T., & Tomšej, T. (2011). Bilance emisí znečišťujících látek z malých zdrojů znečišťování se zaměřením na spalování tuhých paliv. *Chemické Listy*, 105, 851–855.
- Jacobson, M. (2002). *Atmospheric pollution: history, science and regulation*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Kraus, I. (2009). *Fyzika v kulturních dějinách Evropy. Romantici a klasikové* (1. ed.). Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- Manual, S. (2005). Model 3563 Integrating Nephelometer, (December).
- Massoli, P., Murphy, D. M., Lack, D. a., Baynard, T., Brock, C. a., & Lovejoy, E. R. (2009). Uncertainty in Light Scattering Measurements by TSI Nephelometer: Results from Laboratory Studies and Implications for Ambient Measurements. *Aerosol Science and Technology*, 43(11), 1064–1074. doi:10.1080/02786820903156542
- Müller, T., Laborde, M., Kassell, G., & Wiedensohler, a. (2011). Design and performance of a three-wavelength LED-based total scatter and backscatter integrating nephelometer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(6), 1291–1303. doi:10.5194/amt-4-1291-2011
- Nave, R. (2005). Blue Sky and Mie Scattering. Retrieved from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html#c2>
- O'Connor, J. J., & Robertson, E. F. (1999). Abu Ali al-Hasan ibn al-Haytham. Retrieved from <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Al-Haytham.html>
- Robinson, A. (2007). *The story of measurement*. London: Thames and Hudson.
- Rojo, A. G., & Berman, P. R. (2010). Rayleigh scattering revisited: From gases to crystals. *American Journal of Physics*, 78(1), 94–101.
- Satheesh, S., & Krishnamoorthy, K. (2005). Radiative effects of natural aerosols: A review. *Atmospheric Environment*, 39(11), 2089–2110. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.12.029
- Schwartz, S. E. (1996). The whitehouse effect - short wave radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: an overview, 27(3), 359–382.
- Štoll, I. (2009). *Dějiny fyziky* (1. ed.). Praha: Prometheus.
- TSI. (2012). INTEGRATING NEPHELOMETER MODEL 3563 Accurately determine the scattering coefficient of atmospheric aerosol even in the cleanest conditions. Retrieved from tsi.com
- Vallero, D. (2008). *Fundamentals of Air Pollution* (4. ed.). Amsterdam: Elsevier.

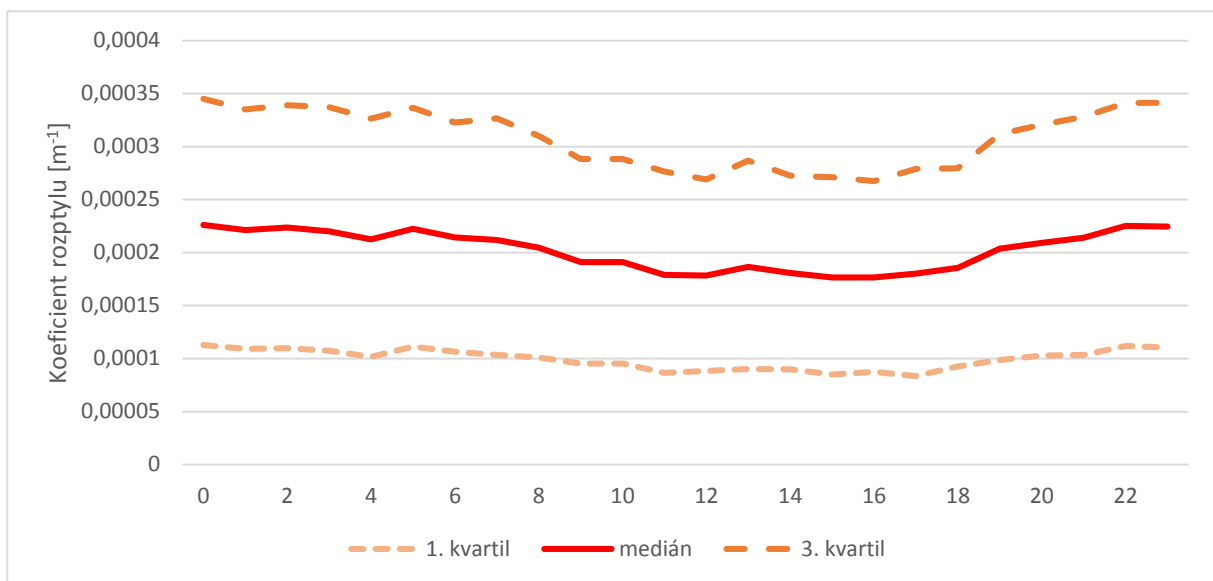
6. Přílohy



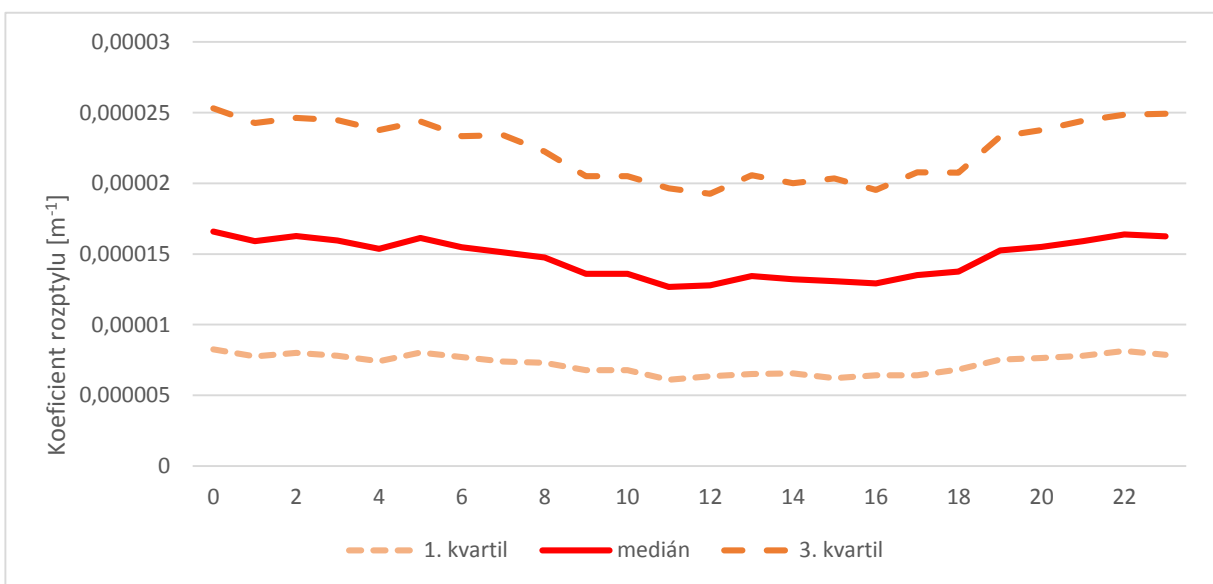
Graf č. 11. Denní chod rozptylu světla v roce 2013 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 554 nm (zelená).



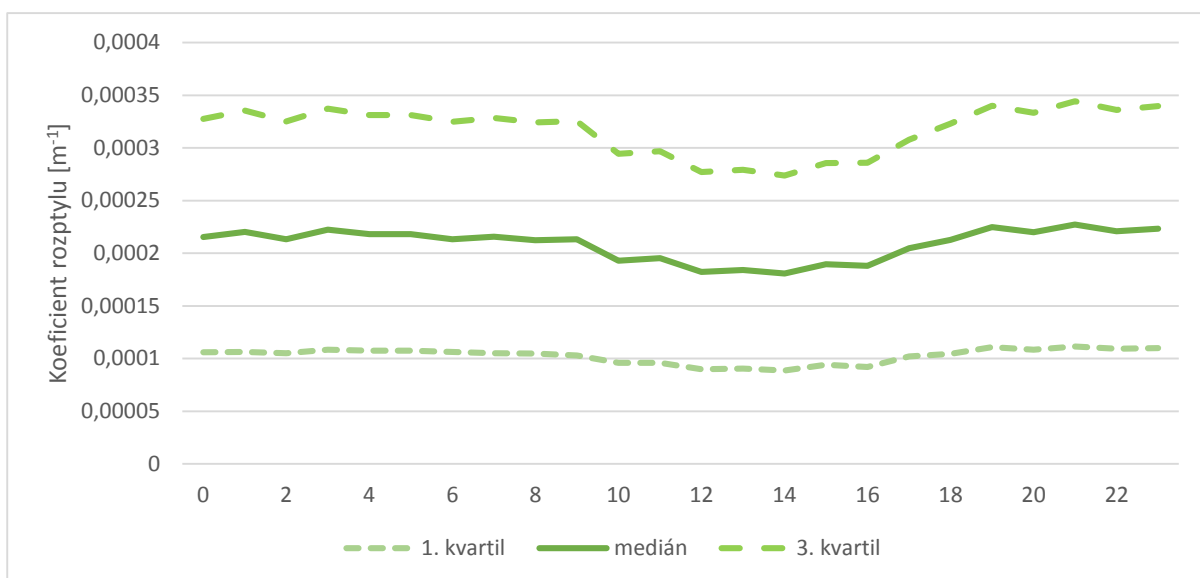
Graf č. 12. Denní chod zpětného rozptylu světla v roce 2013 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 554 nm (zelená).



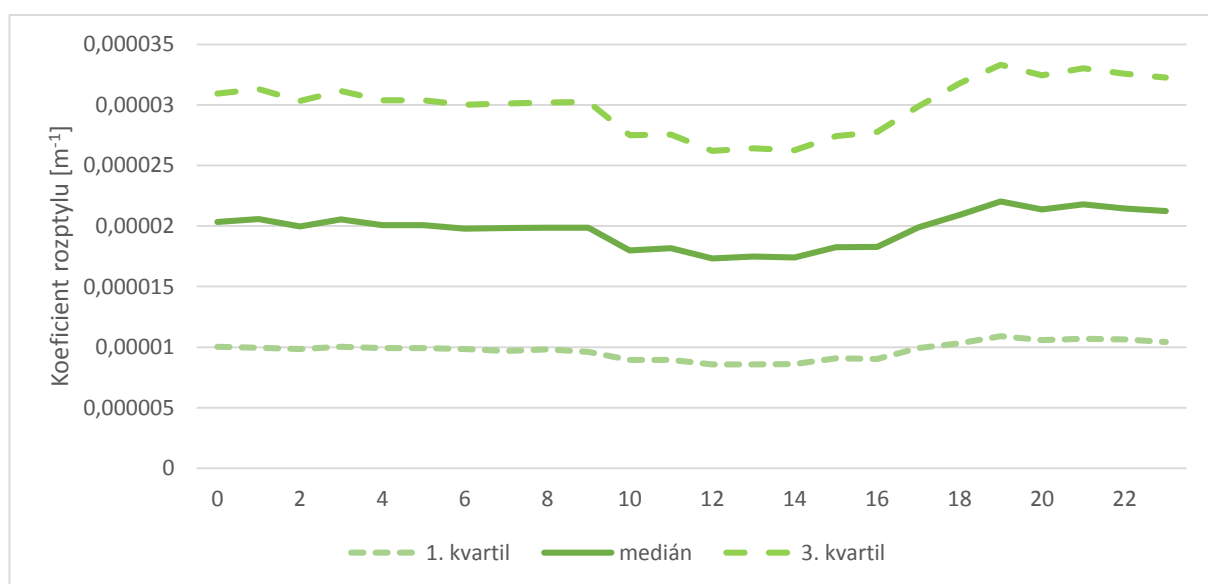
Graf č. 13. Denní chod zpětného rozptylu světla v roce 2013 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 698 nm (červená).



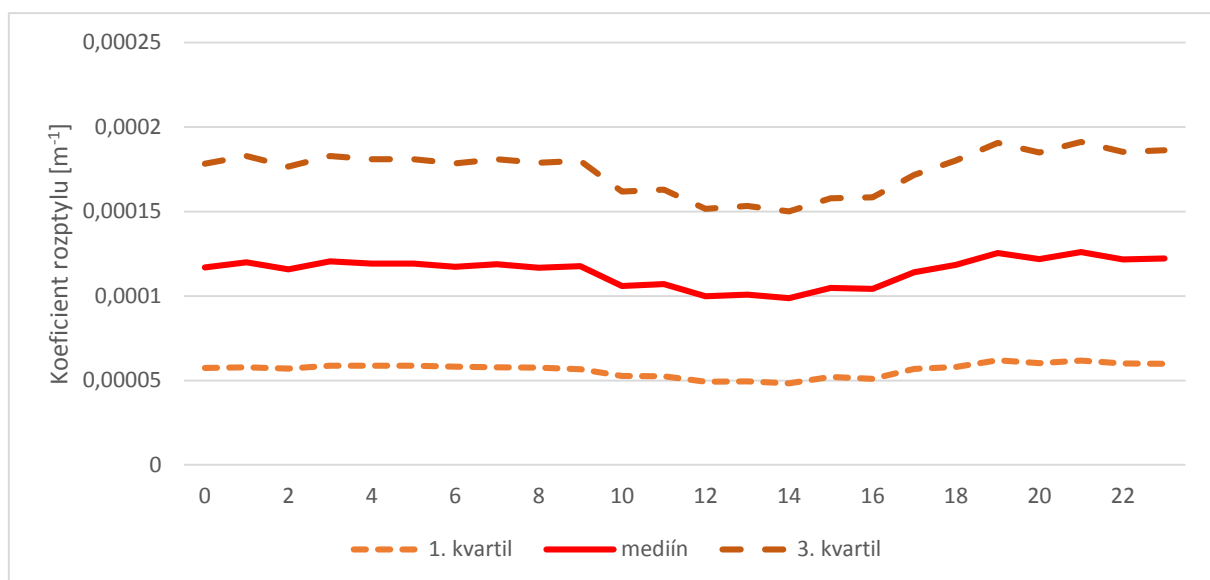
Graf č. 14. Denní chod zpětného rozptylu světla v roce 2013 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 698 nm (červená).



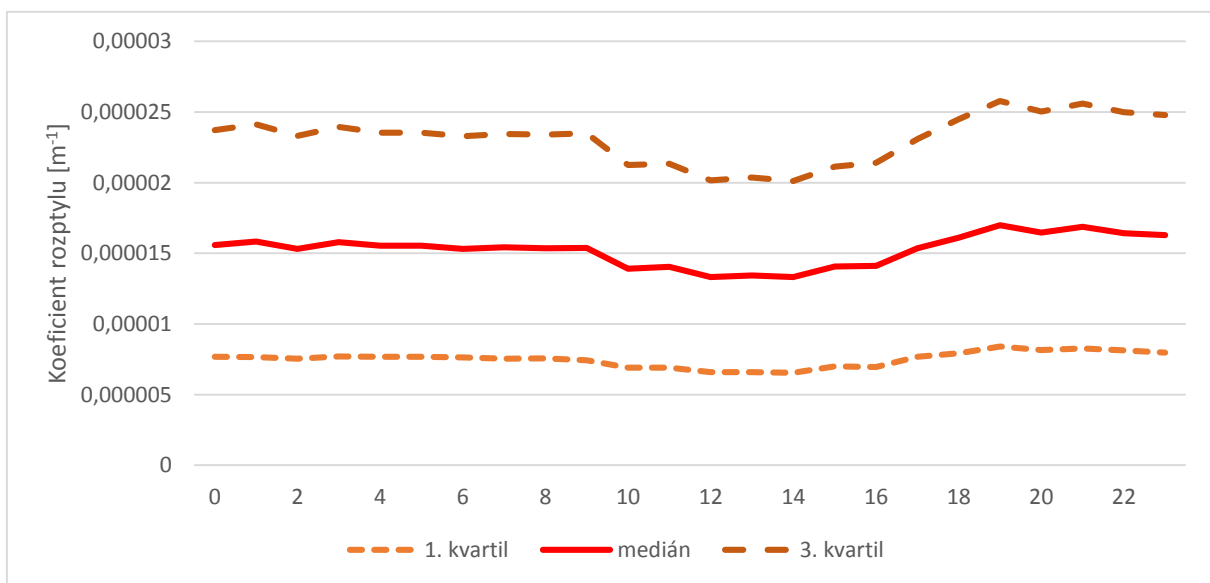
Graf č. 15. Denní chod rozptylu světla v roce 2014 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 554 nm (zelená).



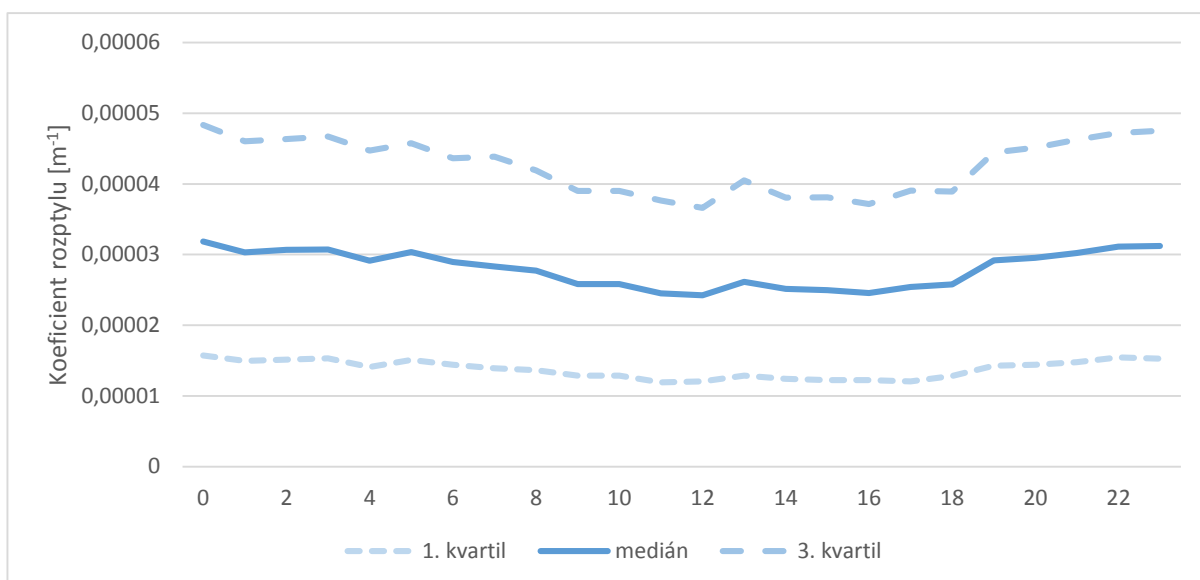
Graf č. 16. Denní chod zpětného rozptylu světla v roce 2014 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 554 nm (zelená).



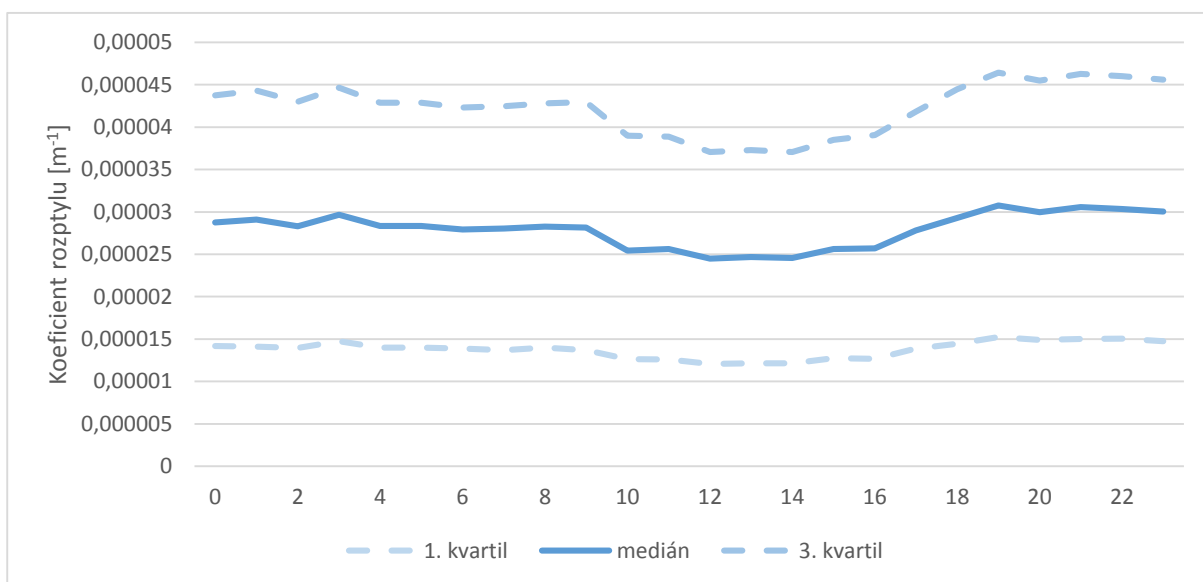
Graf č. 17. Denní chod rozptylu světla v roce 2014 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 698 nm (červená).



Graf č. 18. Denní chod zpětného rozptylu světla v roce 2014 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 698 nm (červená).



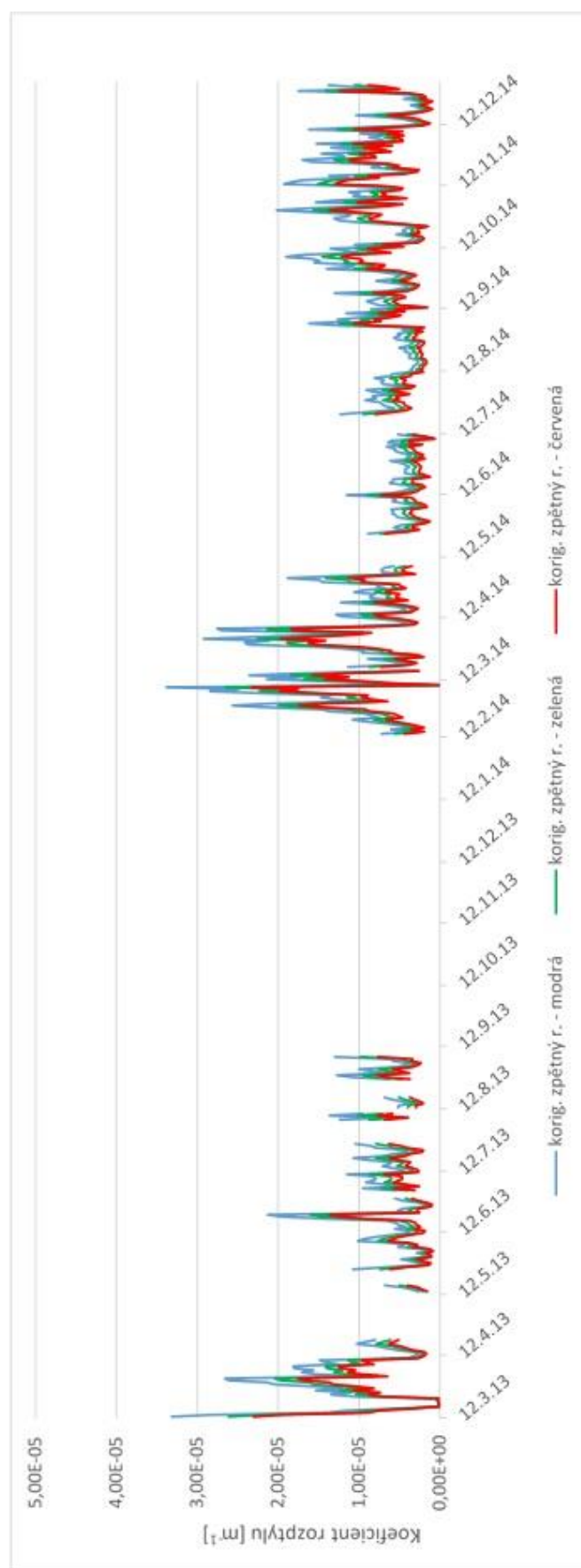
Graf č. 19. Denní chod zpětného rozptylu světla v roce 2013 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 453 nm (modrá).



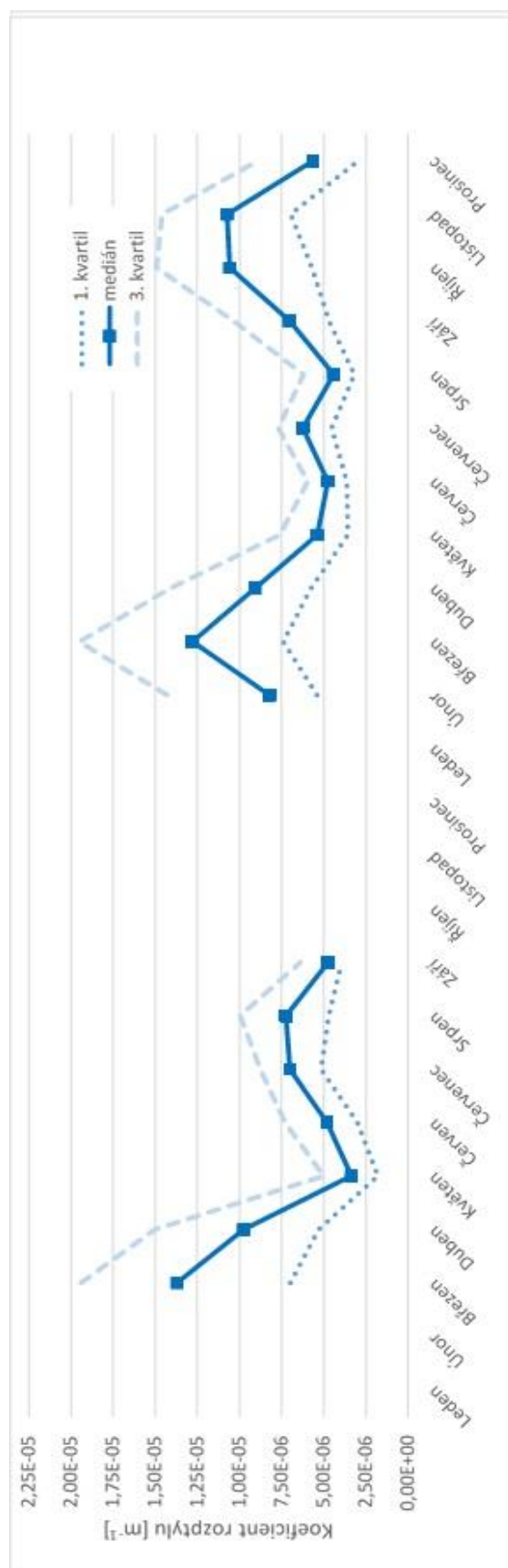
Graf č. 20. Denní chod zpětného rozptylu světla v roce 2014 v mediánu, 1. kvartilu (25%) a 3. kvartilu (75%) o vlnové délce 453 nm (modrá).



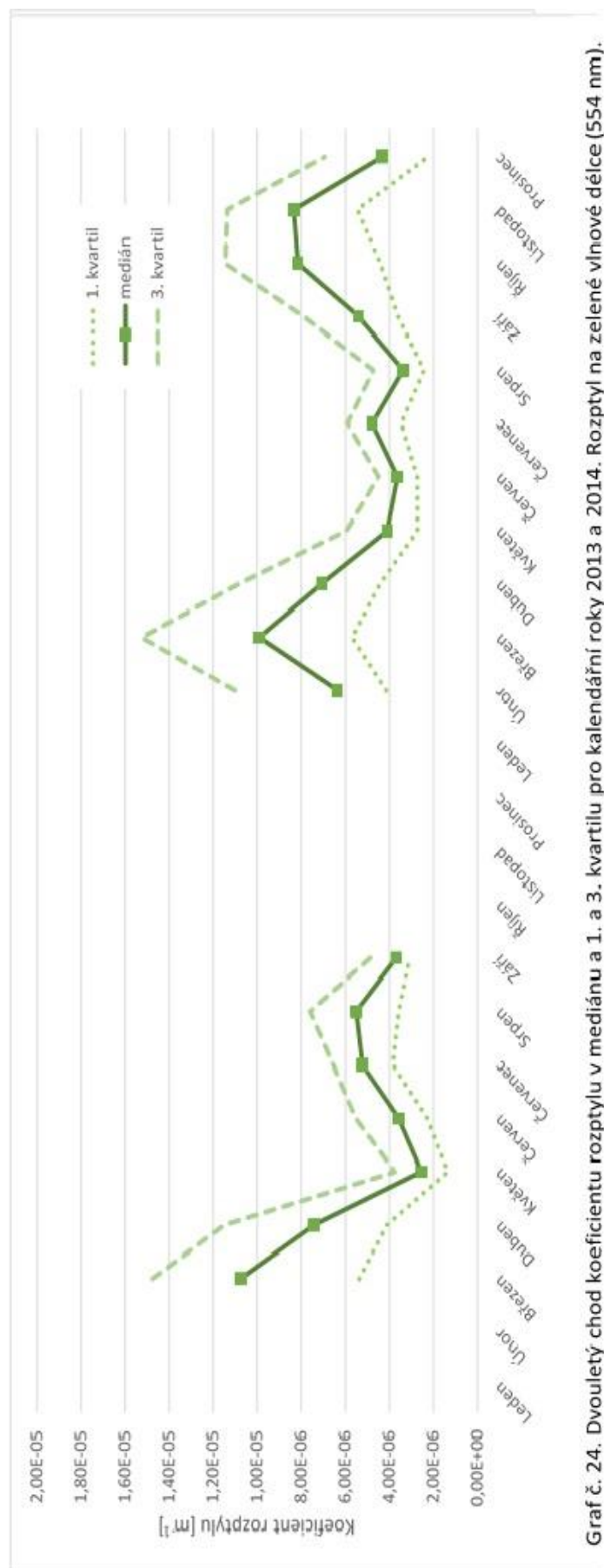
Graf č. 21. Znázornění časové závislosti rozptylu světla pro oba kalendářní roky (2013+2014). Měřeno na třech vlnových délkách - 453nm (modrá), 554nm (zelená) a 698nm (červená).



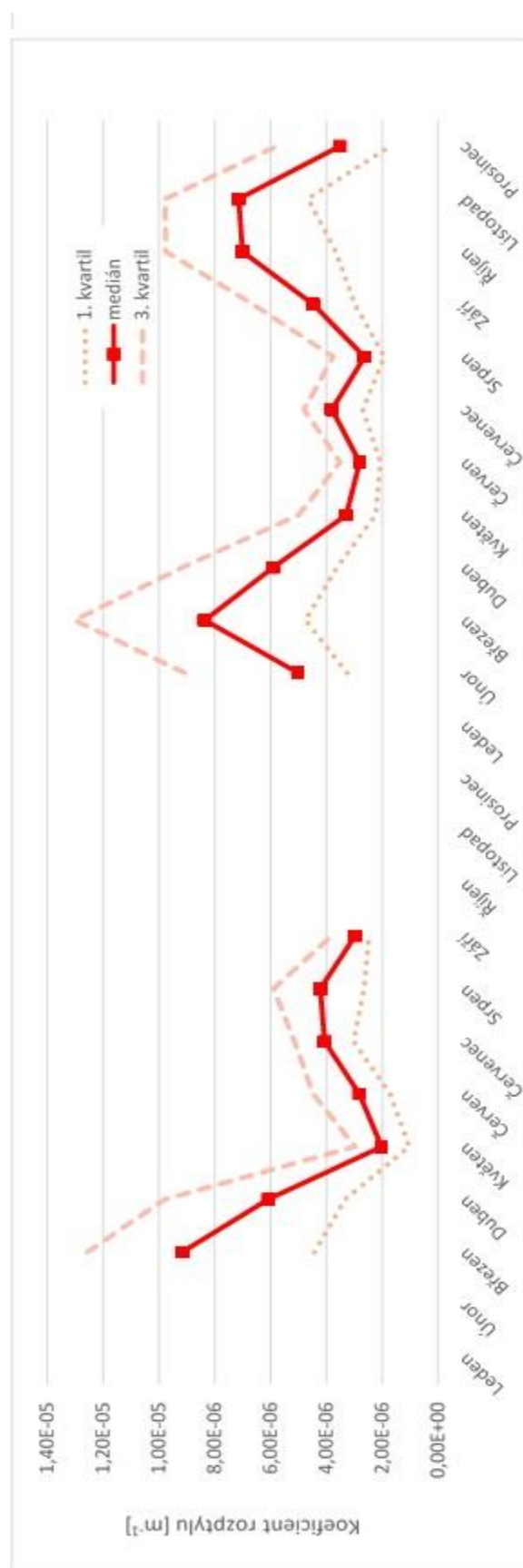
Graf č. 22. Znázornění časové závislosti zpětného rozptylu světla pro oba kalendářní roky (2013+2014). Měřeno na třech vlnových délkách -453nm (modrá), 554nm (zelená) a 698nm (červená).



Graf č. 23. Dvouletý chod koeficientu rozptylu v mediánu a 1. a 3. kvartilu pro kalendářní roky 2013 a 2014. Rozptyl na modré vlnové délce (453nm).



Graf č. 24. Dvouletý chod koeficientu rozptylu v mediánu a 1. a 3. kvartilu pro kalendářní roky 2013 a 2014. Rozptyl na zelené vlnové délce (554 nm).



Graf č. 25. Dvouletý chod koeficientu rozptylu v mediánu a 1. a 3. kvartilu pro kalendářní roky 2013 a 2014, Rozptyl na červené vlnové délce (698 nm).